



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA
(Departamento de Geomagnetismo y Exploración)

*Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias
Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente
Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis
y Evolución de los Suelos Volcánicos en México*

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(Geofísica de la Tierra Sólida)

PRESENTA:
JORGE FRANCISCO RIVAS ORTIZ

Director de Tesis:
Dra. Beatriz Ortega Guerrero
(Instituto de Geofísica)

Comité Tutorial:
Dra. Beatriz Ortega Guerrero, (Instituto de Geofísica UNAM)
Dr. Lorenzo Vázquez Selem, (Instituto de Geografía, UNAM)
Dr. Sergey Sedov, (Instituto de Geología, UNAM)



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Cuando un científico, siguiendo una intuición suya, se pone a la búsqueda de una explicación lógica y verificable de un fenómeno determinado, confía desde el principio que encontrará una respuesta, y no se detiene ante los “fracasos”. No considera inútil la intuición originaria, solo porque no ha alcanzado el objetivo; más bien dirá con razón que no ha alcanzado aún la respuesta adecuada”.

*“FIDES ET RATIO”
(Juan Pablo II)*

Comité

Examinador: Dr. Lorenzo Vázquez Selem

(Depto. Geografía física, Instituto de Geografía, UNAM)

Dr. Avto Gogichaisvili

(Laboratorio de Magnetismo Natural (LIMNA), Instituto de Geofísica, IGUM, UNAM)

Dra. Beatriz Ortega Guerrero

(Geomagnetismo y Exploración, Instituto de Geofísica, UNAM)

Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo

(Edafología, (Paleosuelos), Instituto de Geología, UNAM)

Dr. Héctor Víctor Cabadas Báez

(Laboratorio de Geología, Facultad de Geografía, UAEM)

Comité

Predocctoral: Dr. Marco Adrián Eduardo Chaparro

Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería (CIFICEN, UNCBA), Centro Científico Tecnológico (CCT, CONICET), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Dr. Avto Gogichaishvili

(Laboratorio de Magnetismo Natural (LIMNA), Instituto de Geofísica, IGUM, UNAM)

Dra. Ana María Soler Arechalde

(Geomagnetismo y Exploración, Instituto de Geofísica, UNAM)

Dr. Jorge E. Gama Castro

(Edafología, (Paleosuelos), Instituto de Geología, UNAM)

Dr. Sergey Sedov

(Edafología, (Paleosuelos), Instituto de Geología, UNAM)

Comité

Tutorial:

Dra. Beatriz Ortega Guerrero

(Geomagnetismo y Exploración, Instituto de Geofísica, UNAM)

Dr. Lorenzo Vázquez Selem

(Depto. Geografía física, Instituto de Geografía, UNAM)

Dr. Sergey Sedov

(Edafología, (Paleosuelos), Instituto de Geología, UNAM)

Asesor de

Tesis:

Dra. Beatriz Ortega Guerrero

(Geomagnetismo y Exploración, Instituto de Geofísica, UNAM)

Doctorante: Jorge Francisco Rivas Ortiz



Of. No. PCT/ESR/1184/15

Asunto: Aprobación de tema, asesor de tesis
y asignación de jurado para examen de grado.

JORGE FRANCISCO RIVAS ORTIZ

ESTUDIANTE DE DOCTORADO

PRESENTE,

El Comité Académico de Posgrado, reunido el 1 de diciembre del año en curso, les solicita revisar si esta bien planteado el título de tesis **"Análisis de parámetros magnéticos en suelos de la faja volcánica Transmexicana: Un registro de la dinámica ambiental, pedogénesis y evolución de los suelos volcánicos en el Centro de México"**. Así mismo ratificó a la Dra. Beatriz Ortega Guerrero, como su asesora de tesis y designó a los siguientes investigadores como jurado para su examen de grado.

Dr. Lorenzo Vázquez Selem	Presidente
Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo	Vocal
Dra. Beatriz Ortega Guerrero	Secretario
Dr. Avto Goguichaishvili	Suplente
Dr. Héctor Cabadas Baez	Suplente

Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Ciudad Universitaria, a 2 de diciembre de 2015.

COORDINADORA DEL PROGRAMA


DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO

ESR' /achg

OF. No. PCT/ESR/528/17

Asunto: Cambio de Título de Tesis.

JORGE FRANCISCO RIVAS ORTIZ
Estudiante de Doctorado
Presente,

El Comité Académico del Posgrado, reunido en sesión ordinaria el 25 de abril del presente año, aprobó modificar el título de tesis a petición de algunos de los sinodales. El Comité Académico recomienda que el título sea el siguiente: "Estudio de la mineralogía magnética y sus propiedades en secuencias pedológicas de la faja volcánica Transmexicana como fuente complementaria de la información ambiental, pedogénesis y evolución de los suelos volcánicos en México".

Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, a 26 de abril de 2017.
COORDINADORA DEL PROGRAMA



DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO

ESR'Imf

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

Dedicatoria y Agradecimientos

Dedicatoria

El desarrollo y realización de esta investigación ha sido posible gracias a las bendiciones recibidas por mi Señor, a quién le dedico este trabajo. Con estas líneas, quiero manifestarle mi agradecimiento por su infinita misericordia, por compadecerse de mí y por brindarme ésta segunda oportunidad, en la que solo Tú y yo sabemos lo que ha significado este encuentro que me ha acercado más a Tí.

¡GRACIAS Señor y Dios mío! Por caminar junto a mí, y estar conmigo en aquellos momentos que más te he necesitado. Tú infinita sabiduría, que va más allá de cualquier comprensión humana, me ha enseñado que por más adverso que pueda ser el camino, siempre lo has recorrido conmigo. Y aunque en ocasiones vaya más allá de mis fuerzas, me renuevas con mayor ímpetu para seguir adelante a través de tanta gente maravillosa y otra quizás no tanto, pero que de igual forma contribuyen en mi búsqueda por ser una mejor persona.

¡GRACIAS Señor mío! Porque no me dejas solo, porque me brindas tú alegría y me llenas de tú gracia; porque has puesto a mucha gente linda durante el desarrollo de este gran sueño e ilusión...pero sobre todo en mi vida de la que aprendo mucho cada día.

¡GRACIAS Señor mío!

Obviamente, el desarrollo de este cuentito de Geoficción lo dedico a mis Padres, intentando manifestarles un poco de mi enorme gratitud. ¡GRACIAS! por compartir conmigo este largo y sinuoso camino para poder alcanzar este proyecto, el cual comenzó literalmente cuando aprendía a dar mis primeros pasos, en el maravilloso campus de Ciudad Universitaria. Austedes: ¡GRACIAS! Esto es por y para ustedes, como un intento por mostrar mi agradecimiento por todo su amor, cariño, paciencia, y apoyo brindados.

Mil ¡GRACIAS! por compartir conmigo esta gran ilusión, pero sobre todo por estar conmigo durante el recorrido de mis alegrías y tristezas, triunfos y derrotas, así como su gran apoyo para poder levantarme y seguir con la construcción de todos mis sueños y proyectos. Con estas líneas trato de plasmar aunque sea un poco, mi inmensurable cariño y agradecimiento por sus increíbles, inigualables e invaluable sacrificios, esfuerzos y entrega para brindarnos una formación y principios. ¡GRACIAS! Por enseñarnos a seguir nuestros sueños con determinación, a defenderlos y luchar día a día por ser consistentes entre lo que sentimos, pensamos, queremos, decimos y hacemos. Solo puedo decirles:

“A pesar de todo... Finalmente... ¡Lo hemos logrado!”

Desde luego, el resultado de este Magicuento de PedoMagia Magnética lo dedico a mi gran dolor de cabeza a: ¡*mis San Tute y San Toto!* (cómplices en un sin fin de mis travesías y locuras), que con su invaluable ayuda también han contribuido para terminar esta etapa. Esto ha sido sin duda también por y para ustedes. No tengo palabras para expresarles mi gratitud por todo su cariño, ayuda, paciencia y apoyo brindados no solo durante el desarrollo de este proyecto, sino por caminar conmigo en la búsqueda por ser una mejor persona. Pero sobre todo, ¡GRACIAS! por ser mis hermanas, mis amigas, mis cómplices, y por compartir conmigo tantas alegrías y tristezas que nos han acontecido durante este caminar. Por supuesto, tienen toda mi admiración, cariño y respeto por su gran paciencia para conmigo, lo que de antemano sé que con frecuencia no ha sido es cosa sencilla en más de una ocasión. Por fin puedo hacerles entrega del resultado de ésta travesía:

“¡No nos bajamos del barco... Misión cumplida!”

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Dedicatoria y
Agradecimientos

Por supuesto, el desarrollo y resultado de esta travesía lo dedico a mis hermanos de toda la vida: Horacio Reyes G., Anita Obregón V. de R., Christian Borunda P. ^(†), Angie Padrón S. de B., Jesús Barrientos R. y claro está, para Ana Pau!

¡GRACIAS! por honrarme con su amistad, por estar siempre conmigo en las verdes y las coloradas durante todos estos años. Se dice fácil e incluso parece que fue ayer, pero aguantarme... eso sí que ha sido una ardua y difícil tarea para todos ustedes. Estoy consciente de ello, y se los agradezco de todo corazón. Gracias por brindarme la oportunidad de conocerlos, así como por la confianza que me han concedido.

Por otro lado, también dedico este trabajo a nuestro ***gabinete médico: integrado por*** los médicos, enfermeras y personal del H. Juárez (Unidades de Oncología, Endocrinología, Medicina Nuclear, Oftalmología, Radiología y Laboratorios) en especial al Dr. Nicolás Sánchez Ramírez, Dr. Francisco J. García, Dra. Cristina Alvarado, Dr. Ramírez. Igualmente a los médicos y personal del H. General de México (Unidad de Oncología, Gastroenterología, Cardiología, Neurología, Rehabilitación Física, Radiología, y Laboratorios) especialmente al Dr. José Luis Pérez Hernández, Dr. Adalberto Corral Medina, Dr. Oscar Villacetín Figueroa, Dr. Marisol Galvez, Dr. Belinda y M. Nataly López Matus, así como a los especialistas de medicina alternativa, especialmente a la Profa. Teresa. A los médicos y personal de los institutos INCAN, INNSZ, muy especialmente a Dra. Graciela Castro Narro, Dra. Sarai León, Dr. Rodrigo Juanico, así como a los médicos de la UMF15, especialmente a la Dra. María de la Luz García Espinosa, así como a los médicos del HGZ1A (Unidad de Oncología, Oncología médica, Gastroenterología,) de manera especial Dra. Nayeli Reyes García, Dra. Adriana Juárez Albarrán, y Dr. Jesús Reyes Palma. A todos ellos mi más sincero y enorme agradecimiento por su gran trabajo, esfuerzo, entrega, en pro de aplicar sus conocimientos y capacidades para con mi familia, así como por su enorme paciencia, apoyo y calidad humana que nos han estado brindado. A todo el gabinete médico... ¡GRACIAS!

Desde luego, que todo esto no habría sido posible sin el apoyo y guía de nuestro ***gabinete espiritual:*** a quienes dedico este documento en gratitud a todas las atenciones e intenciones que han estado realizando por mi familia, y el apoyo brindado en momentos complicados. De manera especial a los sacerdotes P. Fulgencio Ortiz ^(†), P. Guillermo, P. Moisés Viguera ^(†), P. Rodrigo Castro Morales, y P. José Antonio Hernández. A todos ustedes... ¡GRACIAS!

Quiero dedicar este trabajo al resto de mis familiares, a mis tíos, primos y sobrinos, que a pesar de las distancias, han estado al tanto de los acontecimientos de mi vida y de mi núcleo, dejando incluso en ocasiones, sus diferencias para estar al pendiente de mi núcleo. A ustedes, mi gratitud. De igual forma, este trabajo lo dedico a la memoria de todos aquellos familiares y amigos que compartieron conmigo el comienzo de esta gran ilusión, pero que las circunstancias nos han llevado a tomar caminos diferentes y que no veo desde hace mucho tiempo, más no por ello, los olvido, sino al contrario, los echo mucho de menos y les agradezco su participación desde y durante éste proyecto. Al personal de viajes Cazares, especialmente a la Sra. Blanca por todo las facilidades y apoyo brindado para con un servidor. También agradezco el apoyo recibido de familias Cabañas Martínez, Trejo Parada, y Sánchez Barrera. A todos ustedes, mi gratitud por su apoyo para con mi familia en los momentos requeridos.

Dedico el presente documento a todos los familiares y amigos que me apoyaron y acompañaron con gran entusiasmo durante los inicios y el recorrido de este sueño, mismo que ha demorado más de lo contemplado y que se me han adelantado ^(†), no logrado ver físicamente de momento, la tan anhelada culminación de éste proyecto y del cual he recibido su invaluable ayuda.

Este trabajo también se lo dedico a las tres grandes damas que he tenido la oportunidad y bendición de conocer, y que han enriquecido invaluablemente mi vida, a mis grandes y especiales amigas: Leticia Martínez Z., Heidi Gonzaga, y Laura P. Mondragón M., por todo lo compartido, y aunque hemos tomado caminos diferentes, siempre me han brindado su apoyo y amistad, sobre todo cuando he requerido de una mano amiga, lo que en verdad aprecio mucho de corazón, y que NO olvidaré: “*Siempre adelante... con pasión y locura*”. Por último, pero no menos importante, quiero dedicar este trabajo a toda la gente que ha sido muy importante en mi formación académica desde aquellas primeras etapas de mi vida. A las maestras Griselda, Alma, Rita, Tere, Eva, Alejandra, Lucila, Ricardo, Fernando, y Antonio.

Agradecimientos

Como siempre lo fue, es y será, quiero expresar de nuevo mi eterna gratitud para la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por cobijarme una vez más, y permitirme formar parte de su gran comunidad universitaria en otra etapa más de mi preparación, de la cual me siento orgulloso y privilegiado de formar parte. Porque ser **PUMA** no solo es la afición por un equipo, es llevar tatuados los colores “Azul y Oro” en el Alma y el Corazón. Simple y sencillamente es un estilo de vida. Siempre le estaré agradecido por la oportunidad que me ha brindado para poder ser parte del 0.025% de la población de nuestro país que tiene la fortuna de llegar, de momento, hasta aquí en esta extraordinaria institución y accediendo a su gran nivel de excelencia; que la convierten en la más grande institución educativa del país.

Agradezco a CONACYT por el financiamiento que me otorgó a través de su beca para poder realizar la presente investigación doctoral. También agradezco el apoyo de los proyectos vinculados con las regiones de estudio de la Dra. Beatriz Ortega Guerrero, Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo y Dr. Sergey Sedov.

Quiero manifestar mi gratitud a la Dra. Beatriz Ortega Guerrero y Elizabeth Solleiro Rebolledo por la oportunidad que me han brindado para continuar con este proyecto que me apasiona, por sus valiosos comentarios, atenciones, y el apoyo ofrecido, que hoy me permiten culminar esta etapa. De igual modo, también quiero dar las gracias por todas las valiosas observaciones y el tiempo que durante este proceso, me facilitaron los doctores que conformaron los comités tutorial (Dr. Beatriz Ortega, Dr. Lorenzo Vázquez, Dr. Sergey Sedov), de candidatura (Dr. Marcos Adrian Eduardo Chaparro, Dr. Avto Gogichaisvili, Dra. Ana María Soler Arechalde, Dr. Jorge E. Gama Castro, y Dr. Sergey Sedov) y jurado (Dr. Lorenzo Vázquez, Dra. Elizabeth Solleiro, Dra. Beatriz Ortega, Dr. Avto Gogichaisvili, Dr. Héctor Cabadas).

También, quiero expresar mi total agradecimiento para los departamentos del Geomagnetismo y Exploración (*Paleomagnetismo* y *Geomagnetismo*) del Instituto de Geofísica, al departamento Edafología (*Paleosuelos*) del Instituto de Geología, a los Centros de Ciencias de la Atmósfera y Geociencias, así como al Posgrado en Ciencias de la Tierra, todos de la UNAM, por las facilidades brindadas para hacer uso de sus instalaciones, laboratorios y equipos.

Agradezco a todos los profesores e investigadores, quienes siempre dieron su mejor esfuerzo por brindarme bases sólidas, y que aportaron muchísimo a este documento con sus comentarios, observaciones y sugerencias. Muy especialmente quiero dar las gracias a la Dra. Ana María Soler Arechalde, Dra. Carolina Jasso Castañeda, Dr. Avto Gogichaisvili, Claus y Christina Siebe Garbach, Jaime H. Urrutia Fucugauchi, Dr. Jorge Gama Castro y al Dr. Lorenzo Vázquez Selem por su gran entrega y disposición. Sigam por ese camino, ustedes son un claro ejemplo de querer hacer un cambio positivo.

También quiero agradecer muy especialmente al Dr. Andrés Tejero Andrade (F.I.), M.C. Gerardo Cifuentes Nava (FI-IGF), Dr. Osvaldo Sánchez Zamora (FI-IGF), Dr. Thomas Morales Acoltzin (FI-IGF/CCA), y Dr. Víctor Manuel Malpica Cruz (FI-IGL), por el entusiasmo con el que me brindaron las bases teóricas durante mi estancia por la Facultad de Ingeniería (UNAM) y que sembraron en mí, la motivación para continuar.

Por supuesto, que no puede faltar el personal del programa de posgrado en Ciencias de la Tierra. De forma muy especial agradezco a las señoritas Laura Mendoza Fuentes, Mónica Lizbeth Salgado Miranda y Araceli Chaman Gamez, así como a la Lic. Graciela Solache y Luz Mireya Chávez Hernández por su disposición y paciencia para conmigo, así como por su apoyo durante todo este tiempo en mi segunda casa. A los coordinadores del posgrado por el apoyo brindado durante mi estancia en mi segundo hogar, el Instituto de Geofísica. En especial al Dr. Oscar Campo, Dra. Blanca Mendoza, Dr. Gustavo Tolson Jones y Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo.

Mi gratitud para todo el personal de los institutos, laboratorios y bibliotecas de la UNAM que me ha apoyado durante todo este tiempo, desde mis primeros pasos por éstos. En especial al Sr. Antonio Sánchez, Sr. Eligio Jiménez, Sra. Aida Sáenz, a los técnicos Jorge Salgado G., Víctor Macías Aviña, Martín y Lorenzo Espinosa P., M.C. Antonio González R., M.C. Ángel Ramírez Luna, Dr. Alejandro Rodríguez y al Ing. Carlos Lináes, por toda su ayuda y el apoyo brindado durante mi estancia en el Instituto. También quiero agradecer de forma muy especial al personal del Instituto Joel Juárez Aparicio y Aurelio Ferrusca Guido, Sra. Ofé, Sra. Jose, Sra. Hortencia, a Rebeca, Elsa, Esther, Alejandro, Maru y Melissa, por su apoyo, atenciones y compañía durante todos esos largos días festivos, fines de semana, vacaciones, Navidades y Años nuevos en el Instituto, pero sobre todo por su amistad y sus palabras de aliento. Quiero manifestar mi agradecimiento al personal de

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

*Dedicatoria y
Agradecimientos*

cómputo de ambos institutos: Ingenieros Miguel García P., Héctor Tecanhuey S, Manuel Vázquez O., Rosario Flores R., y Francisco Montaña C. por el apoyo brindado en el soporte técnico.

Quiero agradecer a todos aquellos investigadores a quienes les llegue a saturar con mis cuestionamientos (personalmente y a través de sus correos electrónicos), y quienes sin embargo siempre mostraron una gran disposición, paciencia, con todas sus atenciones para conmigo. En especial a los Profesores: Dr. Subir K. Banerjee, Dr. Mike Jackson, Dr. Rick Oaches, Dr. Ramón Egli, Dr. Christopher Geiss, Dr. Qionsang Liu, Dr. Sheggao Lu, Dra. Milagrosa Aldana, Dr. Marco A. Eduardo Chaparro, Dr. Vincenzo Constanzo, Dra. Hanna Fialova, Dra. Neli Jordanova, Dra. Diana Jordanova, Dr. Marco Slodoban, Dra. Andrea Bartel y Dra. Birgit Terhorst. GRACIAS a todos ustedes por su paciencia y gran disposición.

También quiero intentar expresar mi gratitud a la Dra. María G. Ceja Rodríguez, Dra. Carolina Jasso Castañeda, Dra. Luz María Rivas Sánchez, Dra. Miriam Velazco, Dra. Elia Escobar, Dr. Héctor V. Cabadas Báez, Dr. Rubén F. Cejudo y Dr. Gabriel Vázquez Castro por toda su ayuda que me han brindado en el laboratorio, durante el trabajo de campo, por las infinitas y fructíferas discusiones, así como el apoyo recibido durante la etapa de análisis e interpretación de los datos de esta investigación. Pero sobre todo y más allá de cualquier cosa... por su amistad. A los colegas de laboratorios: Lic. Nidia Tibón, Dra. Diana Angélica Avendaño Villeda, Dra. Vianey G. Cruz Fitz, Dra. Ángeles Ortiz Beltrán, Dr. Arnaldo Hernández Cardona...por su amena compañía durante nuestras estancias en los laboratorios e instalaciones de los institutos. A todos mis colegas y compañeros con quienes tuve la oportunidad de pasar una infinidad de travesías durante mi estadía. Especialmente a los M.C. Cecilia Limón Hernández, M.C. Francis García, M.C. Keren Mendoza, M.C. Alfredo González, M.C. Jaime Díaz, M.C. Yazmin Rivera, Dra. Berenice Castillo Solís, Ing. Federico Landa, Dr. Cesar Salcido Berckovich, M.C. Becket Laison, Dra. Valerie Pompa, M.C. Roberto Sandoval e Ing. Cesar Neri. Gracias por regalarme tantos momentos agradables.

De igual forma quiero agradecer a toda la gente de la Universidad Autónoma de Chihuahua, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Universidad Autónoma de Puebla, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Universidad Autónoma de Querétaro, Universidad Nacional Autónoma de México (Institutos de Física, Química y Geografía, así como a las Facultades de Ingeniería, Química, Geografía y Ciencias), Universidad Autónoma de Michoacán, Universidad Simón Bolívar (USB, Ven.) Universidad de Minnesota (USA), y del Centro de Geociencias (UNAM), por todo su apoyo y los gratos momentos que me obsequiaron. Especialmente a las Quím. Araceli Romero y Gabriela Solís, Ing. Carolina Guillot Ugalde, así como a la M.c. Verónica García Villamar, al Arqueol. Joel Torrices, y Dr. Gildardo Naranjo. Por último pero no por eso menos importante, quiero manifestar mi agradecimiento a todos los colegas con quien tuve la oportunidad de compartir las instalaciones y laboratorios en donde se llevaron a cabo las mediciones de esta investigación, quienes me brindaron muy enriquecedoras y amenas estadías durante los procesos y que con la diversidad de sus formaciones y perspectivas han contribuido para mejorar este documento.

A todos Ustedes: ¡Mil GRACIAS!

Índice del documento

Dedicatoria y agradecimientos.....	viii
Índice de documento.....	xii
Índice de Figuras.....	xvii
Índice de Tablas.....	xix
Abreviaturas.....	xxi
Síntesis de la Investigación Doctoral.....	xxii

Capítulo 1

1 Introducción.....	3
1.1 Magnetismo Ambiental en Suelos Volcánicos Modernos en México.....	6
1.1.1 Justificación.....	8
1.1.2 Hipótesis.....	9
1.1.3 Objetivos.....	10
1.1.3.1 Objetivos particulares.....	10

Capítulo 2

2 Antecedentes.....	14
2.1 Análisis de parámetros magnéticos en suelos.....	14
2.2 Magnetismo de rocas aplicado en suelos volcánicos.....	17

Capítulo 3

3 Metodología.....	23
3.1 Selección del área de estudio.....	24
3.2 Trabajo de campo.....	25
3.3 Trabajo de laboratorio.....	25
3.3.1 Propiedades magnéticas.....	25
3.3.2 Propiedades no magnéticas.....	29

Capítulo 4

4 Área de estudio.....	34
4.1 Faja Volcánica Transmexicana.....	34
4.2 Región I: Valle de Teotihuacán.....	37
4.2.1 Perfil CGBE (cerro Gordo, cima).....	39

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Contenido:
Índice del documento

	Página
4.2.2 Perfil CGN (cerro Gordo, ladera).....	41
4.2.3 Perfil MAS (San Martín de las Pirámides).....	43
4.2.4 Perfil SNP (Río San Pablo).....	43
4.2.5 Perfil OTM (Otumba).....	44
4.3 Región 2: Glacis de Buenavista	46
4.3.1 Perfil BV (Buenavista).....	52
4.3.2 Perfil AHLV (Ahuatenco, Ahuatenco).....	52
4.3.3 Perfil AHVT (Ahuatenco, Ahuatenco).....	53
4.3.4 perfil SUVT (Santa Úrsula Noria).....	54
4.4 Región 3: Nevado de Toluca	56
4.4.1 Perfil CR (Nevado de Toluca, Cráter).....	59
4.4.2 Perfil IGF1N (Nevado de Toluca, ladera 1).....	59
4.4.3 Perfil IGF2N (Nevado de Toluca, ladera 2).....	61
4.4.4 Perfil IGF1D (Nevado de Toluca, ladera 3).....	61
4.4.5 Perfil IGF2D (Nevado de Toluca, ladera 4).....	62

Capítulo 5

5 Resultados	66
5.1 Valle de Teotihuacán	66
5.1.1 Curvas k vs T.....	66
5.1.2 Curvas de adquisición de IRM y ciclos de histéresis.....	68
5.1.3 Perfiles magnéticos CGBE (Cambisol, Cerro Gordo, cima).....	70
5.1.4 Perfiles magnéticos de CGN (Cambisol, cerro Gordo, ladera).....	73
5.1.5 Perfiles magnéticos de MAS (Calcisol, San Martí de las Pirámides).....	76
5.1.6 Perfiles magnéticos SNP (Fluvisol, San Pablo).....	79
5.1.7. Perfiles magnéticos de OTM (Fluvisol, Otumba).....	82
5.2 Glacis de Buenavista	87
5.2.1 Curvas k vs T.....	87
5.2.2 Curvas de adquisición de IRM y ciclos de histéresis.....	89
5.2.3 Perfiles magnéticos BV (Andosol, Buenavista).....	89
5.2.4 Perfiles magnéticos de AHLV (Luvisol, Ahuetenco).....	91
5.2.5 Perfiles magnéticos de AHVT (Vertisol, Ahuetenco).....	94
5.2.6 Perfiles magnéticos de SUVT (Vertisol, Santa Úrsula Noria).....	97
5.3 Volcán Nevado de Toluca	104
5.3.1 Curvas k vs T.....	104
5.3.2 Curvas de adquisición de IRM y ciclos de histéresis.....	106
5.3.3 Perfiles magnéticos de CR (Regosol, Nevado de Toluca, Cráter).....	108

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Contenido:
Índice del documento

	Página
5.3.4 Perfiles magnéticos de IGF1N (Regosol, Ladera 1).....	111
5.3.5 Perfiles magnéticos de IGF2N (Regosol, Ladera 2).....	114
5.3.6 Perfiles magnéticos IGF1D (Regosol, Ladera 3).....	118
5.3.7 Perfiles magnéticos IGF2D (Regosol, Ladera 4).....	121

Capítulo 6

6 Discusión	128
6.1 Valle de Teotihuacán	128
6.1.1 Perfil CGBE (Cambisol, Cerro Gordo, cima).....	128
6.1.2 Perfil CGN (Cambisol, Cerro Gordo, ladera).....	130
6.1.3 Perfil MAS (Calcisol, San Martín de las Pirámides).....	134
6.1.4 Perfil SNP (Fluvisol, San Pablo).....	137
6.1.5 Perfil OTM, (Fluvisol, Otumba).....	138
6.1.6 Relación entre parámetros magnéticos.....	141
6.1.7 Grado de Pedogénesis y su relación con los parámetros magnéticos (VT).....	149
6.2 Glacis de Buenavista	155
6.2.1 Perfil BV (Andosol, Buenavista).....	155
6.2.2 Perfil AHLV (Luvisol, Ahuetenco).....	157
6.2.3. Perfil AHVT (Vertisol, Ahuetenco).....	161
6.2.4. Perfil SUVV (Vertisol, Santa Úrsula Noria).....	164
6.2.5 Relación entre los parámetros magnéticos.....	165
6.2.6 Grado de Pedogénesis y su relación con los parámetros magnéticos (GB).....	170
6.3 Volcán Nevado de Toluca	176
6.3.1 Perfil CR (Cráter, Regosol).....	176
6.3.2 Perfil IGF1N (Regosol, Ladera 1).....	179
6.3.3 Perfil IGF2N (Regosol, Ladera 2).....	181
6.3.4 Perfil IGF1D (Regosol, Ladera 3).....	184
6.3.5 Perfil IGF2D (Regosol, Ladera 4).....	188
6.3.6 Relación entre parámetros magnéticos.....	191
6.3.7 Grados de Pedogénesis y su relación con los parámetros Magnéticos (VNT).....	194
6.4 Modelo de Pedogénesis Magnética	197
6.4.1 Pedogénesis magnética de suelos volcánicos de evolución incipiente.....	198
6.4.2 Pedogénesis magnética de suelos volcánicos de evolución moderada.....	202
6.4.3 Pedogénesis magnética de suelos volcánicos de evolución avanzada.....	208
6.5 Pedogénesis magnética de suelos volcánicos con aumento magnético superficial	212

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Contenido:
Índice del documento

	Página
6.6 Análisis comparativo entre estadios de la pedogénesis magnética en suelos volcánicos	218
6.6.1 Análisis magnético entre estadios de Cambisoles volcánicos.....	220
6.6.2 Análisis magnético entre estadios de Andosoles volcánicos.....	222
6.6.3 Análisis magnético entre estadios de Luvisoles volcánicos.....	224
6.7 Comparación magnética entre registros de evolución pedológica de otras secuencias	226
6.7.1 Regosol.....	227
6.7.2 Fluvisol.....	228
6.7.3 Cambisol.....	229
6.7.4 Andosol.....	230
6.7.5 Vertisol.....	232
6.7.6 Luvisol.....	234
6.7.7 Calcisol.....	236
6.8 Pedogénesis magnética como herramienta para los registros ambientales en México	238

Capítulo 7

7 Conclusiones	245
-----------------------------	-----

Capítulo 8

8 Bibliografía	253
-----------------------------	-----

Capítulo 9

9 Anexos	271
Síntesis de la interpretación de los parámetros magnéticos de los suelos del valle de Teotihuacán.....	271
Síntesis de la interpretación de los parámetros magnéticos de los suelos del Glacis de Buenavista.....	273
Síntesis de la interpretación de los parámetros magnéticos de los suelos del volcán Nevado de Toluca.....	275
Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos con aumento magnético superficial.....	278
Esquema sinóptico de la pedogénesis magnética.....	280
Artículo.....	281

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Contenido:
Índice del documento

Página

Capítulo 10

10 Apéndices	303
10. A Interpretación de parámetros magnéticos	303
10. A.1 Parámetros de composición.....	303
10. A.2 Parámetros de concentración.....	308
10. A.3 Parámetros de dominio magnético.....	308
10. A.4 Parámetros de dureza magnética.....	310
10. A.5 Parámetros no magnéticos.....	311
10. B Conceptos de suelos	312
10 C Documentación.....	317

Índice de Figuras

Figura 1.- Representación esquemática de la pedogénesis de un suelo y su dinámica.....	4
Figura 2.- Localización de las tres regiones principales en las que se han agrupado los suelos.....	7
Figura 3.- Características ambientales de los suelos estudiados.....	36
Figura 4.- Localización de los perfiles estudiados en la región (1), valle de Teotihuacán (VT).....	38
Figura 5.- Registro de precipitación y temperatura en las localidades de la región 1, valle de Teotihuacán (VT).....	40
Figura 6.- Ubicación y distribución en una sección de los perfiles estudiados en el valle de Teotihuacán.....	42
Figura 7.- Localización de los perfiles estudiados en la región (2), Glacis de Buenavista (GB).....	47
Figura 8.- Registro la precipitación y temperatura en las localidades de la región 2, Glacis de Buenavista (GB).....	49
Figura 9.- Ubicación y distribución en una sección de los perfiles estudiados en el Glacis de Buenavista.....	51
Figura 10.- Localización de los perfiles estudiados en la región (3), volcán Nevado de Toluca (VNT).....	57
Figura 11.- Registro de precipitación y temperatura en la localidad 3, volcán Nevado de Toluca (VNT).....	58
Figura 12.- Ubicación y distribución en una sección de los suelos estudiados en el volcán Nevado de Toluca.....	60
Figura 13.- Curvas k vs T de los perfiles pedológicos estudiados en la región 1, valle de Teotihuacán (VT).....	67
Figura 14.- Curvas de adquisición de la magnetización isothermal remanente (IRM) y ciclos de histéresis de los suelos del valle de Teotihuacán.....	69
Figura 15.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en CGBE.....	71
Figura 16.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en CGN.....	74
Figura 17.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en MAS.....	77
Figura 18.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en SNP.....	80
Figura 19.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en OTM.....	83
Figura 20.- Curvas k vs T de los perfiles pedológicos estudiados en la región 2, el Glacis de Buenavista, (GB).....	88
Figura 21.- Curvas de adquisición de la magnetización isothermal remanente (IRM) y ciclos de histéresis de los suelos estudiados en el Glacis de Buenavista.....	90
Figura 22.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en BV.....	92
Figura 23.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en AHLV.....	95

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Contenido:
Índice de Figuras

	Página
Figura 24.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en AHVT.....	98
Figura 25.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en SUVT.....	101
Figura 26.- Curvas k vs T de los perfiles pedológicos estudiados en la región 3, el volcán Nevado de Toluca (VNT).....	105
Figura 27.- Curvas de adquisición de la magnetización isoterma remanente (IRM) y ciclos de histéresis de los estudiados en el volcán Nevado de Toluca.....	107
Figura 28.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en CR.....	109
Figura 29.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF1N.....	112
Figura 30.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF2N.....	115
Figura 31.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF1D.....	119
Figura 32.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF2D.....	122
Figura 33.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos del valle de Teotihuacán (VT).....	145
Figura 34.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos del Glacis de Buenavista (GB).....	168
Figura 35.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos del volcán Nevado de Toluca (VNT).....	193
Figura 36.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos con evolución pedológica incipiente.....	199
Figura 37.- Diagramas de dispersión-interacción entre parámetros magnéticos de los suelos con evolución pedológica moderada.....	203
Figura 38.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos con evolución pedológica avanzada.....	209
Figura 39.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos con un realce magnético superficial.....	214
Figura 40.- Comparación entre parámetros magnéticos de perfiles volcánicos modernos y antiguos.....	219
Figura 41.- Pedogénesis magnética como herramienta en registros ambientales en México.....	239
Figura 42.- Representación esquemática de la alteración de algunos de los minerales más representativos que son estudiados a través de los parámetros magnéticos.....	304
Figura 43.- Ejemplos de curvas k vs T a temperatura ambiente de minerales magnéticos.....	306

Índice de Tablas

Tabla 1.- Características generales de la evolución pedológica de los suelos estudiados.....	11
Tabla 2.- Procesos de formación y alteración de los minerales magnéticos.....	23
Tabla 3.- Sinopsis de la interpretación de parámetros magnéticos.....	26
Tabla 4.- Color del suelo como indicador de algunos minerales magnéticos.....	31
Tabla 5.- Valores de algunas propiedades y características de los suelos del valle de Teotihuacán.....	45
Tabla 6.- Valores de algunas propiedades y características de los suelos del Glacis de Buenavista.....	55
Tabla 7.- Valores de algunas propiedades y características de los suelos del volcán Nevado de Toluca.....	63
Tabla 8.- Valores registrados en algunos de los parámetros magnéticos de los suelos del valle de Teotihuacán.....	86
Tabla 9.- Valores registrados en algunos de los parámetros magnéticos de los suelos del Glacis de Buenavista.....	103
Tabla 10.- Valores registrados en algunos de los parámetros magnéticos de los suelos del volcán Nevado de Toluca.....	125
Tabla 11a.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de CGBE.....	132
Tabla 11b.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de CGN.....	133
Tabla 11c.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de MAS.....	136
Tabla 11d.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de SNP.....	139
Tabla 11e.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de OTM.....	142
Tabla 12a.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de BV.....	158
Tabla 12b.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de AHLV.....	160
Tabla 12c.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de AHVT.....	163
Tabla 12d.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de SUVT.....	166
Tabla 13a.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de CR.....	178
Tabla 13b.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de IGF1N.....	182
Tabla 13c.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de IGF2N.....	185
Tabla 13d.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de IGF1D.....	187
Tabla 13e.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de IGF2D.....	190
Tabla 14.- Síntesis de la caracterización de los suelos con realce magnético superficial.....	217
Tabla 15.- Síntesis de la caracterización de los suelos del valle de Teotihuacán (VT).....	271

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Contenido:
Índice de Tablas

	Página
Tabla 16.- Síntesis de la caracterización de los suelos del Glacis de Buenavista (GB).....	273
Tabla 17.- Síntesis de la caracterización de los suelos del Volcán Nevado de Toluca (VNT).....	275
Tabla 18.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos con aumento.....	278
Tabla 19.- Esquema sinóptico de la pedogénesis magnética.....	280

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Contenido:
Abreviaturas

Abreviaturas

ARM.- Magnetización anhisterética remanente.
 AHLV.- Luvisol ubicado en Ahuetenco.
 AHVT.- Vertisol ubicado en Ahuetenco.
 Akg.-Akaganita.
 A.P.- Antes del presente.
 BV.-Andosol ubicado en el Glacis de Buenavista.
 CGBE.- Cambisol ubicado en la cima de Cerro Gordo.
 CGN.- Cambisol ubicado en la ladera Cerro Gordo.
 CNA.- Comisión Nacional del Agua.
 CR.-Regosol ubicado en el cráter del Nevado de Toluca.
 CV.- Cubierta vegetal.
 Ferr.- Ferridrita.
 FFS.- Factores formadores de suelo.
 FVTM.- Faja Volcánica Transmexicana.
 GB.- Glacis de Buenavista.
 GR.-Grado de reversibilidad
 Greg.-Greigita.
 Gth.- Goethita.
 Hc.- Coercitividad.
 H_{CR}.- Coercitividad remanente.
 HIRM₃₀₀.-Magnetización isoterma remanente en campos altos, 300mT.
 Hmt.-Hematita.
 IGF.- Instituto de Geofísica (UNAM).
 IGF1D.- Regosol ubicado en la ladera norte del Nevado de Toluca.
 IGF1N.- Regosol ubicado en la ladera norte del Nevado de Toluca.
 IGF2D.- Regosol ubicado en la ladera norte del Nevado de Toluca.
 Uvsp.-Ulvoespinela.
 VNT.- Volcán Nevado de Toluca

IGF2N.- Regosol ubicado en la ladera norte del Nevado de Toluca.
 IGL.- Instituto de Geología (UNAM).
 Ilm.-Ilmenita.
 INEGI.- Instituto nacional de estadística, geografía e informática.
 IRM_x ó MIR.- Magnetización isoterma remanente.
 Ka.-Miles de años (10³a).
 Lmn.- Limonita.
 Lpc.-Lepidocrocita.
 Ma.- Millones de años, (10⁶ a).
 MAS.-Calciol ubicado en Maseca.
 Mgt.- Magnetita.
 Mrs.-Magnetización remanente de saturación.
 m snm.- metros sobre el nivel del mar.
 Ms.- Magnetización de saturación.
 NRM.- Magnetización natural remanente.
 Oliv.-Olivino.
 OTM.-Fluvisol ubicado en Otumba.
 PPG.- Procesos pedogenéticos.
 PLO.- Paleosuelo.
 PLOVC.-Paleosuelo volcánico (Cambisol)
 PLOVA.- Paleosuelo volcánico (Andosol)
 PLOVL.- Paleosuelo volcánico (Luvisol)
 PMA.-Precipitación media anual.
 PMG.-Partículas magnéticas.
 PP.- Precipitación pluvial
 RS.-Roca sedimentaria.
 RM.- Roca metamórfica.
 RIA.- Roca ígnea ácida.
 RII.-Roca ígnea intermedia.
 RIB/RIUB.-Roca ígnea básica/ultrabásica.
 V.-Cubierta vegetal.
 VT.- Valle de Teotihuacán.

T.- Temperatura.
 TMA.-Temperatura media anual.
 ITMP.-Intemperismo.
 Px.- Piroxeno.
 Pyr.-Pirita.
 Pyrr.-Pirrotita.
 RMPA.- Abreviatura en ingles de análisis de propiedades de magnetismo de rocas.
 RMS.- Realce magnético superficial.
 Sidr.- Siderita.
 SLP.- Secuencia de loess/paleosuelos.
 SM.- Suelo Moderno.
 SMN.- Servicio Meteorológico Nacional.
 SNP.- Fluvisol ubicado en el río San Pablo.
 SPV.- Secuencia de paleosuelos volcánicos.
 SUVT.- Vertisol ubicado en Ahuetenco.
 SV.- Suelos volcánicos.
 SVM.- Suelos volcánicos modernos.
 SVMC.-Suelo volcánico moderno (Cambisol)
 SVMMA.- Suelo volcánico moderno (Andosol)
 SVMML.-Suelo volcánico moderno (Luvisol)
 SVMMM.-Suelo volcánico moderno (Michoacán)
 T_B.- Temperatura de bloqueo.
 T_C.-Temperatura de Curie.
 Ti (Mgt)_{Ti}.- Titano (magnetita), con pobre contenido de Ti.
 Ti (Mgt)_{Ti}.- Titano (magnetita), enriquecida con Ti.
 Ti (Mgh).- Titano (maghemita).
 Ti (Hmt).- Titano (hematita).
 T_N.-Temperatura de Neel.
 UMICH.- Universidad Michoacana.

Símbolos

χ .- Susceptibilidad magnética por unidad de masa.
 χ_{rel} .- Susceptibilidad magnética dependiente de frecuencias.
 $\chi_{rel\%}$.- Susceptibilidad magnética dependiente de frecuencias, expresado en por ciento.
 χ_{bg} .- Susceptibilidad magnética "básica".
 χ_{ARM} .- Susceptibilidad magnética anhisterética.

Dominios magnéticos

MD.- Dominio múltiple (2mm>).
 PSD.- Dominio pseudo sencillo (0.1-0.2mm).
 SD.- Dominio sencillo (0.03-0.1µm).
 SSD.- Dominio sencillo estable (0.026-0.035µm).

SP.- Dominio superparamagnético (0.003µm).
 SP_F.- Dominio superparamagnético finos (0.011-0.015µm).
 SP_M.- Dominio superparamagnético medianos (0.012-0.023µm).
 SP_G.- Dominio superparamagnético gruesos (0.021-0.36µm).

SP-SP/SD.- Partículas magnéticas de dominio superparamagnético próximo al límite entre los dominios superparamagnético y sencillo.
 SP/SD.- Partículas magnéticas próximos al límite de los dominios superparamagnético y sencillo.
 PSSD.- Partículas magnéticas de dominio pseudo sencillo estable.
 SSD.- Partículas magnéticas de dominio sencillo estable.

SD-SD/SSD.- Partículas magnéticas de dominio sencillo próximo al límite entre los dominios sencillo y sencillo estable.
 SD.- Partículas magnéticas de dominio sencillo.
 ESD.-Partículas magnéticas elongadas de dominio sencillo.
 SD-SD/PSD.- Partículas magnéticas de dominio sencillo próximo al límite entre los dominios sencillo y pseudo sencillo.
 SD/PSD.- Partículas magnéticas próximos al límite entre los dominios sencillo y pseudo sencillos.
 PSD-(MD+SD).- Partículas magnéticas de dominio pseudo sencillo.
 MD.- Partículas magnéticas de dominio múltiple.
 MDs- (SP+SD).- Partículas magnéticas Dominio multiple *secundario*.

Síntesis de la investigación

El suelo se somete a una continua y compleja interacción entre los factores formadores (FFS) y los procesos pedogenéticos (PPG). La estrecha relación que existe entre ambos aspectos constituye su pedogénesis, la cual es responsable de modificarlo física, química y biológicamente. Esto influye directamente en las propiedades del suelo y contribuye a la configuración de sus horizontes. Además, también regula la dirección evolutiva que éste puede alcanzar, lo cual es fuertemente dependiente de las condiciones ambientales que prevalecen durante su formación y cuyas evidencias se registran y preservan en la *memoria del suelo*. De ahí que, en los últimos años los trabajos realizados sobre suelos buscan diversificar la manera de estudiarlos. Para ello, están implementando el uso de nuevas herramientas y métodos (magnetismo de rocas p.ej.) que aporten información complementaria que les permita obtener un mayor entendimiento de las secuencias pedológicas y de su dinámica.

En ese sentido, recientemente se está observando un creciente interés de varias investigaciones (climático y ambientales, arqueomagnéticas, etcétera) por llevar a cabo estudios en suelos que incorporan el uso y análisis de éstas técnicas magnéticas; con la finalidad de adquirir datos que ayuden a comprender mejor las variaciones de su entorno de formación a partir de los minerales magnéticos contenidos dentro de un perfil pedológico (*Rivas et al., 2012; Aguilar et al., 2013; Soler et al., 2015, entre otros*). Esto, debido por un lado a la sensibilidad de los horizontes del suelo para registrar los cambios ambientales, y por otro a la ubicuidad de la mineralogía magnética y sus propiedades, así como las características operativas de los métodos magnéticos (técnicas NO destructivas, rapidez, costos, etcétera) que comparativamente, aventajan a la mayoría de los análisis y pruebas que se realizan en los estudios del suelo.

La mayor parte de los estudios magnéticos en suelos se han realizado en secuencias de origen eólico (antiguos y modernos), mismos que se han caracterizados por tener una baja señal magnética, con un incremento hacia la parte superficial de los perfiles (realce-aumento magnético, ó *magnetic-enhancement*) como su *firma magnética* en la mayoría de los reportes previos. Sin embargo, a pesar del potencial del suelo y de los parámetros magnéticos como un registro de información ambiental, aún resultan ser pocas las investigaciones realizadas en suelos de origen volcánico.

Trabajos previos realizados en diferentes secuencias de paleosuelos volcánicos en México se distinguieron por carecer del *aumento magnético superficial* (*Rivas, 2003; Ortega et al., 2004*). Es decir, éstos presentaron una señal magnética más intensa (respecto a los suelos de origen eólicos) con valores bajos en la parte superior de las secuencias; incrementándose éstos hacia su parte inferior, dando origen así, a una posible rasgo magnético propia y distintivo de ellos. Otra característica que registraron fue que los cambios abruptos y de mayor intensidad, observados en sus propiedades magnéticas, se asociaban con la transición entre los diferentes horizontes fundamentales.

Análisis comparativos posteriores de las propiedades magnéticas realizados entre suelos antiguos con un mismo grado avanzado de evolución fundamental, Luvisol, pero de origen diferente (p.ej., volcánico *versus* eólico), resaltaron el importante papel que tienen las condiciones ambientales y su influencia sobre el material parental (MP), lo que se refleja en los procesos pedogenéticos (tipo y tasas diferentes) que ocurren durante el desarrollo de los suelos (*Rivas, 2006; Rivas et al., 2006*). De esta manera, los trabajos previos han permitido en su conjunto comenzar a adquirir un mayor entendimiento de los suelos volcánicos y sus propiedades, al tener una mejor caracterización magnética de éstos, en donde la variabilidad de sus registros constituye una alternativa como fuente de información ambiental y de los procesos que ocurren en cada perfil.

La presente investigación comprende el estudio de la mineralogía magnética y sus propiedades en catorce perfiles de suelos volcánicos distribuidos dentro de la FVTM. Para su estudio y análisis, éstos se han agrupado en tres regiones principales: 1) valle de Teotihuacán-VT, 2) Glacis de Buenavista-GB, y 3) volcán Nevado de Toluca-VNT. Los suelos están expuestos a condiciones ambientales diferentes, alcanzando a desarrollar diversas etapas incipientes (Regosol, Fluvisol), moderadas (Cambisol, Andosol, Vertisol) y avanzadas (Luvisol, Calcisol) de evolución pedogenética fundamental.

Para su estudio, se lleva a cabo el análisis a detalle de una selección de diferentes parámetros que permiten inferir la composición (k vs T, IRM), concentración (p.ej., χ , SIRM_{IT}), el tamaño de dominio ($\chi_{fd\%}$, ARM/IRM₁₀₀, entre otros) y la coercitividad/dureza (H_{CR}, S₁₀₀, etc.) de las partículas magnéticas, así como la interacción entre varios de éstos parámetros magnéticos. A partir del análisis conjunto y detallado de éstos, se identificó la composición y propiedades de las partículas magnéticas para cada perfil. Las variaciones en las propiedades de la mineralogía magnética analizadas a profundidad en cada uno de ellos (*perfiles magnéticos*) contribuyen a la asignación de firmas magnéticas propias de su desarrollo y evolución (*pedogénesis magnética*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Síntesis de la Investigación

En general, los resultados señalan que la diferencia en el tipo de material parental y los regímenes de precipitación [Pp] y temperatura [T] son factores ambientales que influyen en la cubierta forestal [Cv], así como de forma selectiva y diferencial en el tipo y las tasas del intemperismo de los minerales primarios de los suelos, y en la composición y propiedades de la mineralogía magnética. Las titanio(magnetitas-maghemitas) pobres en Ti son las fases magnéticas más abundantes, $Ti(Mgt-Mgh)_{-Ti}$, mismas que se encuentran mezcladas con minerales de mayor dureza magnética, p.ej., goethita (Gth) y hematita (Hmt). La variación en los *perfiles magnéticos* de los suelos se relaciona con su etapa evolutiva, que magnéticamente está más vinculada con los dominios y la concentración de las partículas magnéticas, que con su composición, la cual es relativamente similar en todos los perfiles.

Dentro del conjunto de suelos con etapa incipiente de pedogénesis analizados, los Regosoles (1000 mm/a < Pp y $T < 4^{\circ}C$ con un MP~roca ígnea ácida, RIA, pH ácido) poseen mayormente $Ti(Mgt-Mgh)_{-Ti}$, mismas que coexisten con Gth y Hmt, con una mayor abundancia de la primera. En los perfiles predominan las partículas ferrimagnéticas en una mezcla de dominios magnéticos que es controlada por abundantes granos MD, $SP < 10\%$ mientras que los SD poseen una tendencia relativa a incrementarse. En el caso de los Fluvisoles (~Pp < 600 mm/a, $T < 16^{\circ}C$, MP más alcalino) éstos también están compuestos por $Ti(Mgt-Mgh)$, pero a diferencia de la etapa evolutiva previa, contienen una mayor concentración relativa de Hmt. Además registran una disminución en la concentración de ferrimagnéticos así como un incremento de partículas SP y SD que reflejan un mayor grado de pedogénesis con respecto a los Regosoles. En general, los perfiles con evolución incipiente muestran una estrecha asociación entre la acidez del suelo y el MP, lo que se relaciona con los regímenes Pp-T, la concentración y dominio de las partículas magnéticas. De este modo, a medida que el (MP) es más alcalino, con un aumento de temperatura y un descenso en la precipitación, decrece la concentración de ferrimagnéticos gruesos, y se incrementa el aporte de minerales de mayor coercitividad.

En el subconjunto de suelos en etapa de evolución moderada, los Cambisoles (MP~roca ígnea intermedia/básica, RII-RIB), con un cambio de cubierta vegetal (ΔCv ~forestal/opuntia), así como una Pp < 900 mm/a y $T \sim 12^{\circ}C$, la mineralogía magnética está compuesta por $Ti(Mgt-Mgh)$ con un contenido moderado de Ti que está mezclada con Gth/Hmt, incrementándose ésta última relativamente. Éstos presentan las concentraciones más altas de ferrimagnéticos de este subgrupo de suelos, así como una mezcla heterogénea de dominios magnéticos caracterizada por tener pocos granos MD, $SP \sim 50\%$ así como un relativo alto contenido de partículas SD. Por el contrario, en el caso de los Vertisoles (MP~menos alcalino que el Cambisol, una Cv diferente, Pp~1000 mm/a y $\sim 20^{\circ}C < T$), la mineralogía magnética que más abunda son las $Ti(Mgt-Mgh)$ con un contenido de moderado a alto en Ti (el mayor de todos los suelos estudiados en este documento), que coexisten con Gth y Hmt con un aumento relativo de las primeras. Predominan los granos MD, con un contenido de $SP < 10\%$, y una abundancia moderada de partículas SD. En el caso del Andosol, (Pp > 1200 mm/a, $T > 20^{\circ}C$, MP~roca ígnea intermedia/básica, RII-RIB), la mineralogía magnética está controlada por las $Ti(Mgt-Mgh)_{-Ti}$, que coexisten con Hmt y Gth, siendo más abundante ésta última. Las propiedades magnéticas del suelo reflejan un estado de desarrollo intermedio con respecto al resto de los suelos en una etapa moderada de evolución, presentan un escaso contenido de partículas MD, $50\% < SP$ y abundantes granos SD, respectivamente. De esta manera, los suelos con mayor acidez, temperatura (Vertisoles) poseen una mayor concentración de partículas MD y la concentración más baja de ferrimagnéticos, lo que sugiere una pedogénesis relativamente más intensa del subconjunto de perfiles de evolución moderada con respecto a los más incipientes.

En las etapas avanzadas de evolución, el Calcisol, (MP roca ígnea intermedia, RII, pH alcalino, Pp < 650 mm/a, $T \sim 16^{\circ}C$), la mineralogía magnética es mayormente del tipo de las $Ti(Mg-Mgh)_{-Ti}$, que coexiste con Gth y/o Hmt reflejando un relativo aumento de Gth. La concentración de ferrimagnéticos es baja y similar a la que existe en los Vertisoles. Esto sugiere un mayor aporte de partículas paramagnéticas a la concentración magnética. La mezcla de dominios es controlada por abundantes granos ~ SP (< 50%) y SD, con ~MD < 10%. En el Luvisol, (pH=7 y MP~análogo al del Calcisol, ~1000 mm/a < Pp, $20^{\circ}C < T$), se registra una concentración de ferrimagnéticos similar a la que se observa en el Calcisol, pero con una mineralogía magnética que además de contener $Ti(Mgt-Mgh)_{-Ti}$ como las fases más abundantes, también contiene Gth/Hmt, con una mayor contribución de ésta última. A diferencia del Calcisol, en el Luvisol es casi nulo el contenido de partículas MD, siendo los granos SP y SD los que más abundan. De esta forma se observa que, para este grupo de suelos (evolución avanzada), a medida que se incrementa los regímenes de Pp-T con una alcalinidad semejante, decrece la concentración de ferrimagnéticos y se incrementa la abundancia de los tamaños de dominios finos y ultra finos.

Los datos obtenidos en este estudio, además de contribuir a establecer una relación entre el grado de evolución-pedogénesis de cada suelo, permiten determinar la influencia de las condiciones ambientales en el desarrollo del suelo, su composición magnética y propiedades. De este modo, al estudiar cada etapa evolutiva del suelo volcánico y poder

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Síntesis de la Investigación

caracterizar magnéticamente su vínculo con el entorno en el que se están desarrollando, la firma de la mineralogía magnética constituye una fuente complementaria de información para la amplia gama de los estudios que se están desarrollando en el país sobre suelos volcánicos con diferentes enfoques.

De esta forma, el documento está compuesto por diez secciones distribuidas en la síntesis del documento, seis capítulos (1-6), conclusiones (7), la bibliografía (8), anexos (9) y apéndices (10) respectivamente. En el capítulo 1 (*Introducción*), abarca una breve sinopsis del suelo como registro de información ambiental, la introducción y uso de los métodos magnéticos en los trabajos del suelo, su aplicación estudios realizados en México, así como la justificación, hipótesis y objetivos de la presente investigación. El capítulo 2 (*Antecedentes*), comprende una síntesis de algunos de los resultados obtenidos a partir del uso de los parámetros magnéticos como herramienta complementaria en diversas secuencias pedológicas de origen eólico y recientemente en aquellas de origen volcánico. El capítulo 3 (*Metodología*), muestra un breve semblante del desarrollo/protocolo que se ha empleado para el desarrollo, estudio e interpretación de los parámetros magnéticos utilizados durante el presente trabajo, así como de algunas otras propiedades de los suelos. El capítulo 4 (*Área de Estudio*), contiene la introducción general del área de estudio (FVTM) y algunas de sus características; y después, análogamente, se describen de manera separada y con mayor detalle las regiones en las que se han agrupado los suelos (valle de Teotihuacán, Glacis de Buenavista, volcán Nevado de Toluca), así como algunas de las características de cada perfil. En el capítulo 5 (*Resultados*), se registran por región los resultados obtenidos a partir de una selección de diversos parámetros magnéticos de composición (k vs. T, entre otros), así como las variaciones a profundidad de concentración (p.ej., χ , NRM), tamaño de dominio ($\chi_{fd\%}$, χ_{ARM} , entre otros), y dureza magnética (H_{CR} , HIRM, etc). El capítulo 6 (*Discusión*), registra el análisis e interpretación de los parámetros magnéticos por suelo dentro de cada región y sus variaciones a profundidad (*perfil magnético*), de manera conjunta dentro de cada región (diagramas de interacción/dispersión), y su posible relación con el grado de pedogénesis. También se lleva a cabo el análisis comparativo entre suelos con la misma evolución pero diferente *estadio*, así como con estudios de secuencias análogas reportados, y se presenta una perspectiva de las posibles aplicaciones de la caracterización de la mineralogía magnética como herramienta para los estudios ambientales que se desarrollan en el país. En el capítulo 7 (*Conclusiones*), se presentan de forma breve las conclusiones, donde se señala de manera generalizada las principales fases magnéticas presentes en los suelos y sus propiedades magnéticas, por región y su relación con las condiciones del entorno en el cual se están desarrollando, por su grado de *pedogénesis magnética*, etc. El capítulo 8 (*Bibliografía*), muestra el compendio de las referencias que se consultaron para el desarrollo del presente documento. Los capítulos 9 (*Anexos*) y 10 (*Apéndices*) respectivamente, contienen de manera breve algunos de los datos y conceptos que se han utilizado durante el desarrollo del análisis magnético y su interpretación, que pueden contribuir a la lectura del documento.

Abstract

The soil continuously is submitted at a complex interaction between the soil formation factors (FFS) and their pedogenetic processes (PPG). The close relationship between both is known like the pedogenesis, which is responsible to modify physically, chemically and biologically the pedological profile. This directly influences in the soil properties and contributes to the configuration his horizons. In addition, it also regulates the pedogenic evolution direction that can reach a profile, (which is strongly dependent of the environmental conditions that occur during their genesis) whose evidences are recorded and preserved in the soil memory. Hence, in the last years the investigations on soils seek to diversify their perspective of study. To this end, they are implementing the use of new tools and methods (eg, rock magnetism) that provide complementary information to gain a better understanding of the pedological sequences and their dynamics. In that sense, has recently been observed a growing interest from climatic, environmental and archeomagnetic researches, among others for carrying out studies in soils that implement the use and analysis of these magnetic techniques, in order to acquire data that allow to understand the variations of their formation environment from the magnetic minerals contained within a pedological profile (*Rivas et al., 2012, Aguilar et al., 2013, Soler et al., 2015*, etc). This is due, on the one hand, to the sensitivity of soil horizons to record environmental changes, and by the other the ubiquity of magnetic mineralogy and its properties, as well as to the operational characteristics of the magnetic methods (Non-destructive techniques, quickness, costs, etc.) that comparatively outstrips to most of the analyzes and tests carried out in soil studies.

The majority of the magnetic studies done in soils have been carried out in ancient and modern eolian sequences. Most of them have been characterized by a low magnetic signal, showing an increase to the upper sequences (*magnetic enhancement*), both features reflect their magnetic signature. However, despite the potential of soil and the magnetic parameters as environmental information record, still are few the volcanic soils investigation set that carry out the magnetic mineralogy study, as in the eolic soil sequences. Nevertheless, in this sense, previous work done on different volcanic paleosols sequences in Mexico were distinguished by lack of *magnetic enhancement* (*Rivas, 2003; Ortega et al., 2004*). This way, the volcanic paleosol profiles showed a higher magnetic signal than eolic soils of previously reports, with lowest values in the upper soil horizons, which were increased to the bottom, establishing an own magnetic signature in them. Another characteristic feature of this soils were the abrupt changes observed in their magnetic profiles, which were associated with the transition between the different fundamental horizons. By other hand, in a subsequent comparative magnetic properties analysis carried out amongst ancient soils sequences (volcanic versus loessic soils) with a same elemental advanced evolution degree (eg Luvisol), emphasized the worthy role of environmental conditions and their influence on them (*Rivas et al., 2006*). With the study, were possible to determine the relationship between the different types of parental material (PM), which is reflected in the pedogenetic processes (at different types and rates) that occur during soil development. So in whole, previous investigations have allowed us beginning to acquire a better understanding of volcanic soils and their properties, by having a better magnetic characterization of these, where the variability of their registers constitutes an alternative as source of environmental information and processes that occur in each profile.

The present research comprise the study of the magnetic mineralogy and their properties on fourteen volcanic soil profiles that are spread into TMVB, which had been grouped in three main regions for their analysis (Teotihuacan valley, Glacis de Buenavista, Nevado de Toluca volcano). The soils are being formed under different environmental conditions, reflecting several early (Regosol, Fluvisol), middles (Cambisol, Andosol, Vertisol) and advanced (Luvisol, Calcisol) of pedogenic evolution stages. For study, it carried out a detailed analysis of a selective set of diverse magnetic parameters that allow to infer the composition (k vs T , IRM), concentration (eg, χ , $SIRM_{1T}$), domain size ($\chi_{fd\%}$, ARM/IRM₁₀₀, among others) and the coercivity-hardness (H_{CR} , S_{100} , etc.) of the magnetic particles from volcanic soils, as well as the interaction among several of those ones. From the joint and detailed analysis of these, the magnetic mineralogy properties and their properties were identified into each pedogenic evolution step. The variations analyzed at depth in the magnetic mineralogy and their properties for each soil (*magnetic profiles*) contribute to the assignment of the magnetic signatures, which shown a close relationship with their development and evolution degree, which has been defined like the *magnetic pedogenesis* of volcanic soils in this document.

In general, the results indicate that the difference in parent material, as well as into the precipitation [Pp] and temperature [T] regimes, are the main environmental factors that influence in soil cover vegetation [Cv], which controlling selectively the way of weathering of primary soils components (kind and rates differentially), and into the composition and properties of magnetic mineralogy. Therefore, the titano(magnetite-maghemite) poor in Ti are the most abundant magnetic phases, $Ti(Mgt-Mgh)_{-Ti}$, which are mixed with minerals of higher magnetic hardness, eg goethite (Gth) and Hematite (Hmt). The variation in the magnetic profiles of the soils is related to its evolutionary stage, which is more magnetically related to the domains and the concentration of the magnetic particles, than to its composition, which is relatively similar in all the profiles.

The Regosols have mostly $Ti(Mgt-Mgh)_{-Ti}$, which coexist with Gth and Hmt, with a greater abundance of the former. Soils have higher ferrimagnetic particles in a mixture of magnetic domains that is controlled by abundant MD grains, SP <10% grains while SDs particles have a relative tendency to increase. By other hand, in the Fluvisols these are also composed of $Ti(Mgt-Mgh)$, but unlike the previous evolutionary stage, they contain a relative higher Hmt

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Síntesis de la Investigación

concentration. They also recorded a ferrimagnetic concentration decrease as well as an increase of SP and SD particles that reflect a higher pedogenesis degree than Regosols. So in general, the incipient pedogenic evolution profiles shows a close association between soil acidity and parent material (MP), which is related to Pp-T regimes, concentration and dominance of magnetic particles. In this way, when the (MP) is more alkaline, with an increase in temperature and a decrease in precipitation, the concentration of coarse ferrimagnetic decreases, and the contribution of minerals of greater coercivity increases.

The Cambisols are composed by Ti(Mgt-Mgh) with a moderate Ti content that is mixed with Gth-Hmt, being the last one relatively higher. Besides, those profiles have the highest ferrimagnetic concentrations of this subgroup of soils (middle evolution stage), as well as a heterogeneous mixture of magnetic domains characterized by a low MD content, SP ~ 50% and a relatively high SD particle concentration. On the contrary, in the Vertisols the most abundant magnetic mineralogy are Ti(Mgt-Mgh) with a moderate to high Ti content, (the highest of all soils presented in this document), which is mixed with Gth-Hmt, being relatively higher the first one. The MD grains predominate in those soils, with a content of SP <10%, and a moderate abundance of SD particles. By the other hand, the magnetic mineralogy in the Andosol is controlled by Ti(Mgt-Mgh)-Ti, which coexist with Hmt and Gth, being more abundant the last one. The magnetic properties of the soil reflect an intermediate development step with respect to the rest of the soils (in moderate evolution stage). Also, present a low content of MD particles, 50% <SP and abundant SD grains, respectively. So, soils with higher acidity, temperature (Vertisols) have a higher concentration of MD particles and the lower concentration of ferrimagnetic, suggesting a relatively more intense pedogenesis of the subset of profiles with respect to the most incipient.

The magnetic mineralogy of Calcisol is mostly of type Ti(Mg-Mgh)-Ti, which coexist with Gth and/or Hmt reflecting a relative increase of Gth. The concentration of ferrimagnetic is low and similar like in the Vertisols. This could suggest a greater contribution of paramagnetic particles to the magnetic concentration. The mixture of domains is controlled by abundant grains ~ SP (<50%) and SD, with ~ MD <10%. By other hand, the Luvisol ferrimagnetic concentration is similar like in Calcisol, but with a magnetic mineralogy that besides containing Ti(Mgt-Mgh)-Ti as the most abundant phases. Also contains Gth-Hmt, with a greater contribution of the last one. Unlike the Calcisol, in the Luvisol is almost null the content of MD particles, being the grains SP and SD the most abundant. Thus, for this group of advanced evolution soils, as the Pp-T regimes with similar, the alkalinity increase, the ferrimagnetic concentration decreases, and the abundance of sizes of fine and ultrafine domains rise.

The data obtained from this research, besides to establishing a relationship of the degree of evolution-pedogenesis of each soil, allow to determine the influence of environmental conditions on soil development, its magnetic composition and properties. Thus, by studying each evolutionary stage of the volcanic soil and being able to magnetically characterize its link with the environment in which they are developing, the signature of magnetic mineralogy constitutes a complementary source information for the wide range of studies that are being developing in the country over volcanic soils with different approaches, perspectives and applications.

The document is composed by eleven sections that include this abstract, seven chapters (1, Introduction; 2 Background; 3, Methodology; 4; Study area; 5, Results; 6, Discussion; 7, Conclusions), as well as the sections associated with the references (8), annexes (9) and appendixs (10), respectively.

Resumé

Le sol est soumis en permanence à une interaction complexe entre les facteurs de formation du sol (SFF) et leurs processus pédogénétiques (PPG). La relation étroite entre les deux est connue comme la pédogénèse, qui est responsable de modifier physiquement, chimiquement et biologiquement le profil pédologique. Cela influence directement les propriétés du sol et contribue à la configuration de ses horizons. De plus, elle règle également la direction de l'évolution pédogénétique qui peut atteindre un profil (qui dépend fortement des conditions environnementales qui se produisent au cours de leur genèse) dont les preuves sont enregistrées et conservées dans la mémoire du sol.

Par conséquent, dans les dernières années, les recherches sur les sols cherchent à diversifier leur perspective d'étude. À cette fin, ils mettent en œuvre l'utilisation de nouveaux outils et méthodes (par exemple, le magnétisme du rock, ou magnétisme environnemental) qui fournissent des informations complémentaires pour mieux comprendre les séquences pédologiques et leurs dynamiques. Dans ce sens, on a récemment observé un intérêt croissant des recherches climatiques, environnementales et archéomagnétiques, entre autres pour la réalisation d'études sur les sols qui mettent en œuvre l'utilisation et l'analyse de ces techniques magnétiques, afin d'acquérir des données permettant de comprendre les variations de leur environnement de formation à partir des minéraux magnétiques contenus dans un profil pédologique (Rivas et al., 2012, Aguilar et al., 2013, Soler et al., 2015, etc.). Cela s'explique, d'une part, par la sensibilité des horizons du sol pour enregistrer les changements environnementaux et par l'autre l'ubiquité de la minéralogie magnétique et de ses propriétés, ainsi que des caractéristiques opérationnelles des méthodes magnétiques (techniques non destructives, rapidité, coûts, etc.) qui dépassent comparativement la plupart des analyses et tests effectués dans les études sur le sol.

La majorité des études magnétiques dans les sols ont été réalisées dans des séquences éoliennes (lössiques) des sols anciennes et modernes. La plupart d'entre eux ont été caractérisés par un faible signal magnétique, montrant une augmentation en les horizons supérieurs. Les deux caractéristiques reflètent leur signature magnétique. Cependant, en dépit du potentiel du sol et des paramètres magnétiques comme enregistrement de l'information environnementale, il existe encore peu d'enquêtes sur les sols volcaniques qui effectuent l'étude complète de la minéralogie magnétique, comme dans les séquences du sol éolique.

Néanmoins, dans ce sens, les travaux antérieurs effectués sur différentes séquences de paléosols volcaniques au Mexique se distinguent par le manque d'augmentation magnétique (Rivas, 2003; Ortega et al. 2004). De cette façon, les profils de paléosol volcanique ont montré un signal magnétique plus élevé que les sols lössiques des rapports antérieurs, avec les valeurs les plus faibles dans les horizons supérieurs du sol, qui ont été augmentées vers le bas, en établissant une signature magnétique propre. Une autre caractéristique de ces sols a été les changements abrupts observés dans leurs profils magnétiques, associés à la transition entre les différents horizons fondamentaux.

D'autre part, dans une analyse comparative ultérieure des propriétés magnétiques effectuée dans les anciennes séquences de sols (sols volcaniques versus lössiques) avec un même degré d'évolution élémentaire (p. Ex. Luvisol), a souligné le rôle digne des conditions environnementales et leur influence sur eux (Rivas et al., 2006). Avec l'étude, il a été possible de déterminer le rapport entre les différents types de matériel parental (PM), qui se reflète dans les processus pédogénétiques (à différents types et taux) qui surviennent lors du développement du sol. Dans l'ensemble, les recherches antérieures nous ont permis de commencer à acquérir une meilleure compréhension des sols volcaniques et de leurs propriétés, en ayant une meilleure caractérisation magnétique de celles-ci, où la variabilité de leurs registres constitue une alternative en tant que source d'information et de processus environnementaux qui se produisent dans chaque profil.

La présente recherche comprend l'étude de la minéralogie magnétique et de leurs propriétés sur quatorze profils de sols volcaniques qui se sont répartis dans le TMVB. Ces ont été regroupés dans trois régions principales pour leur analyse (vallée de Teotihuacan, Glacis de Buenavista, volcan Nevado de Toluca). Les sols se forment dans différentes conditions environnementales, reflétant plusieurs étapes de l'évolution pédogénétique (Regosol, Fluvisol), les couches intermédiaires (Cambisol, Andosol, Vertisol) et avancées (Luvisol, Calcisol).

Pour l'étude, il a procédé à une analyse détaillée d'un ensemble sélectif de divers paramètres magnétiques permettant de déduire la composition (k vs T , IRM), la concentration (χ , SIRM_T), la taille du domaine ($\chi_{fd\%}$, ARM/IRM₁₀₀, entre autres) et la coercivité-dureté (H_{CR} , S_{100} , etc.) des particules magnétiques des sols volcaniques, ainsi que l'interaction entre plusieurs de ceux-ci. À partir de l'analyse conjointe et détaillée de celles-ci, les propriétés de la minéralogie magnétique et leurs propriétés ont été identifiées dans chaque étape d'évolution pédogénétique. Les variations analysées en profondeur dans la minéralogie magnétique et leurs propriétés pour chaque sol (profils magnétiques) contribuent à l'attribution des signatures magnétiques, ce qui montre une relation étroite avec leur degré de développement et d'évolution, qui a été définie comme la *pédogénèse magnétique* des sols volcaniques dans ce document.

En général, les résultats indiquent que la différence dans le matériau parent, ainsi que dans les régimes de précipitation [Pp] et température [T], sont les principaux facteurs environnementaux qui influencent en la couverture de la végétation du sol [Cv], lesquels contrôlent de manière sélective la manière de tempérier les composants des sols primaires (nature et taux différentielle ment), et dans la composition et les propriétés de la minéralogie magnétique. Par conséquent, le titano (magnetite-maghemite) pauvre en Ti sont les phases magnétiques les plus abondantes, Ti (Mgt-Mgh)_{Ti}, qui sont mélangées avec des minéraux de dureté magnétique plus élevée, par exemple goethite (Gth) et Hematite

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Síntesis de la Investigación

(Hmt). La variation des profils magnétiques des sols est liée à son stade évolutif, qui est plus magnétiquement lié aux domaines et à la concentration des particules magnétiques que à sa composition, relativement similaire à tous les profils.

Les Regosols ont surtout Ti (Mgt-Mgh)-Ti, qui coexistent avec Gth et Hmt, avec une plus grande abondance de la première. Les sols ont des particules ferrimagnétiques plus élevées dans un mélange de domaines magnétiques qui sont contrôlés par des grains de MD abondants, SP <10% de grains tandis que les particules de SD ont une tendance relative à augmenter. D'autre part, dans les Fluvisols, ils sont également composés de Ti (Mgt-Mgh), mais contrairement à la phase évolutive précédente, ils contiennent une concentration Hmt relative plus élevée. Ils ont également enregistré une diminution de la concentration ferrimagnétique ainsi qu'une augmentation des particules SP et SD qui reflètent un degré de pédogénèse plus élevé que les Regosols. Ainsi, en général, les profils d'évolution pédogénétique naissants montrent une association étroite entre l'acidité du sol et le matériau parent (MP), qui est lié aux régimes Pp-T, à la concentration et à la dominance des particules magnétiques. De cette façon, lorsque le (MP) est plus alcalin, avec une augmentation de la température et une diminution des précipitations, la concentration de ferrimagnétique grossière diminue et la contribution des minéraux de plus grande coercition augmente.

Les Cambisols sont composés de Ti (Mgt-Mgh) avec un contenu de Ti modéré qui est mélangé avec Gth-Hmt, étant le dernier relativement plus élevé. De plus, ces profils ont les concentrations ferrimagnétiques les plus élevées (pour les sols avec un stade de l'évolution pédogénétique du milieu), ainsi qu'un mélange hétérogène de domaines magnétiques caractérisés par une faible teneur en MD, SP ~ 50% et une concentration de particules SD relativement élevée. Au contraire, dans les Vertisols, la minéralogie magnétique la plus abondante est Ti (Mgt-Mgh) avec une teneur en Ti modérée à élevée (le plus haut de tous les sols présentés dans ce document), qui est mélangé avec Gth-Hmt, étant relativement plus élevé le premier. Les grains MD prédominent dans ces sols, avec un contenu de SP <10% et une abondance modérée de particules SD. D'autre part, la minéralogie magnétique dans l'Andosol est contrôlée par Ti (Mgt-Mgh)-Ti, qui coexiste avec Hmt et Gth, étant plus abondante que la dernière. Les propriétés magnétiques du sol reflètent une étape de développement intermédiaire par rapport au reste des sols (en phase d'évolution pédogénétique modérée). De plus, présentent une faible teneur en particules MD, 50% <SP et granulés SD abondants, respectivement. Ainsi, les sols avec une acidité plus élevée, la température (Vertisols) ont une concentration plus élevée de particules de MD et la plus faible concentration de ferrimagnétique, ce qui suggère une pédogénèse relativement plus intense du sous-ensemble des profils par rapport au plus naissant.

La minéralogie magnétique du Calcisol est principalement du type Ti (Mg-Mgh)-Ti, qui coexiste avec Gth et/ou Hmt reflétant une augmentation relative de Gth. La concentration de ferrimagnétique est faible et similaire comme dans les Vertisols. Cela pourrait suggérer une plus grande contribution des particules paramagnétiques à la concentration magnétique. Le mélange de domaines est contrôlé par des grains abondants ~ SP (<50%) et SD, avec ~ MD <10%. D'autre part, la concentration ferrimagnétique de Luvisol est similaire à celle de Calcisol, mais avec une minéralogie magnétique qui, en plus, contient Ti (Mgt-Mgh)-Ti comme phases les plus abondantes. Il contient également Gth-Hmt, avec une plus grande contribution de la dernière. Contrairement au Calcisol, dans le Luvisol est presque nul le contenu des particules MD, étant les grains SP et SD les plus abondants. Ainsi, pour ce groupe de sols d'évolution pédogénétique avancée, comme les régimes Pp-T similaires, l'augmentation de l'alcalinité, la concentration ferrimagnétique diminue et l'abondance des tailles des domaines fin et ultrafine augmentent.

Les données obtenues à partir de cette recherche, en plus d'établir une relation du degré d'évolution-pédogénèse de chaque sol, permettent de déterminer l'influence des conditions environnementales sur le développement du sol, sa composition magnétique et ses propriétés. Ainsi, en étudiant chaque étape évolutive du sol volcanique et en permettant de caractériser magnétiquement son lien avec l'environnement dans lequel ils se développent, la signature de la minéralogie magnétique constitue une source complémentaire d'information pour le large éventail d'études qui se développent dans la région Pays sur sols volcaniques avec différentes approches, perspectives et applications.

Le document est composé de onze sections qui incluent ce résumé, sept chapitres (1, Introduction, 2 Contexte, 3, Méthodologie, 4; Domaine d'étude, 5, Résultats, 6, Discussion, 7, Conclusions), ainsi que les sections associées Avec les références (8), les annexes (9) et les appendices (10), respectivement.

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

INTRODUCCIÓN

“El hombre cuanto más conoce la realidad y el mundo y más se conoce a sí mismo en su unicidad, le resulta más urgente el interrogante sobre el sentido de las cosas y sobre su propia existencia. Todo lo que se presenta como objeto de nuestro conocimiento se convierte por ello en parte de nuestra vida”.

*“FIDES ET RATIO”
(Juan Pablo II)*

Capítulo 1

1 Introducción

El suelo durante su formación se somete a una serie de complejas transformaciones, como resultado de las variaciones climáticas y ambientales que ocurren en su entorno. Es decir, que durante su pedogénesis (interacción entre los factores formadores y los procesos pedogenéticos) además de modificar física, química y biológicamente sus propiedades, ésta también es responsable de controlar el desarrollo de los horizontes, así como de dirigir la evolución de un perfil pedológico (**Figura 1**). En los últimos veinticinco años se ha observado un creciente interés de diferentes ciencias por estudiar al suelo a través de una amplia gama de métodos y técnicas con el objetivo de poder alcanzar una mejor comprensión de su dinámica de formación (*Emmanuel et al., 2005; Constantini et al., 2009; Safiuddin et al., 2011; Jordanova et al., 2013*). Esto ha permitido relacionar la pedogénesis, especialmente en aquellas secuencias de origen eólico, con su grado de evolución, para establecer la influencia que reciben éstos de las condiciones ambientales que prevalecen durante su formación (*Kumaravel et al., 2010; Jordanova et al., 2011; Lu Sh. et al., 2012; Jordanova et al., 2012*). De ahí que la información que ofrece el estudio de los horizontes, *memoria del suelo* (*Targulian y Goriachin, 2004*) y su caracterización magnética sea de gran interés, debido a la potencial información complementaria que puede aportar no solo para los estudios ambientales y de reconstrucción paleoambiental (*Feng et al., 2004; Geiss y Zanner, 2006; Liu et al., 2012b; Zhao et al., 2013*) sino también para distintas investigaciones (*Rochette et al., 2001; Kapicka et al., 2003; Jordanova et al., 2006; etc.*).

Entre las técnicas que se han estado incorporado con mayor frecuencia a los trabajos pedológicos en años recientes se encuentra el análisis de propiedades de magnetismo de rocas ó estudios de magnetismo ambiental, como también se les conocen (*Thompson y Oldfield, 1986; Oldfield, 1991; Liu Q. et al., 2012c*). Éstos, además de ser rápidos y no-destructivos (comparados con otras técnicas utilizadas frecuentemente en los estudios edáfico/pedológicos), se han empleado de manera exitosa en distintas investigaciones, como en sedimentos lacustres (*Egli, 1999; Ortega et al., 2010 y 2015*) y marinos (*Ellwood et al., 2006; Wassmer et al., 2010*), hasta en estudios paleomagnéticos (*Soler y Urrutia, 1994; Gogichaisvilli et al., 2012a; Soler et al., 2015*) y arqueológicos (*Dalan y Banerjee, 1996 y 1998; Peters et al., 2000; Borezja, 2006*) entre otras aplicaciones que han estado avalando y fomentando el uso de parámetros magnéticos como una potencial herramienta para el estudio del suelo.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México.

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo I:
Introducción

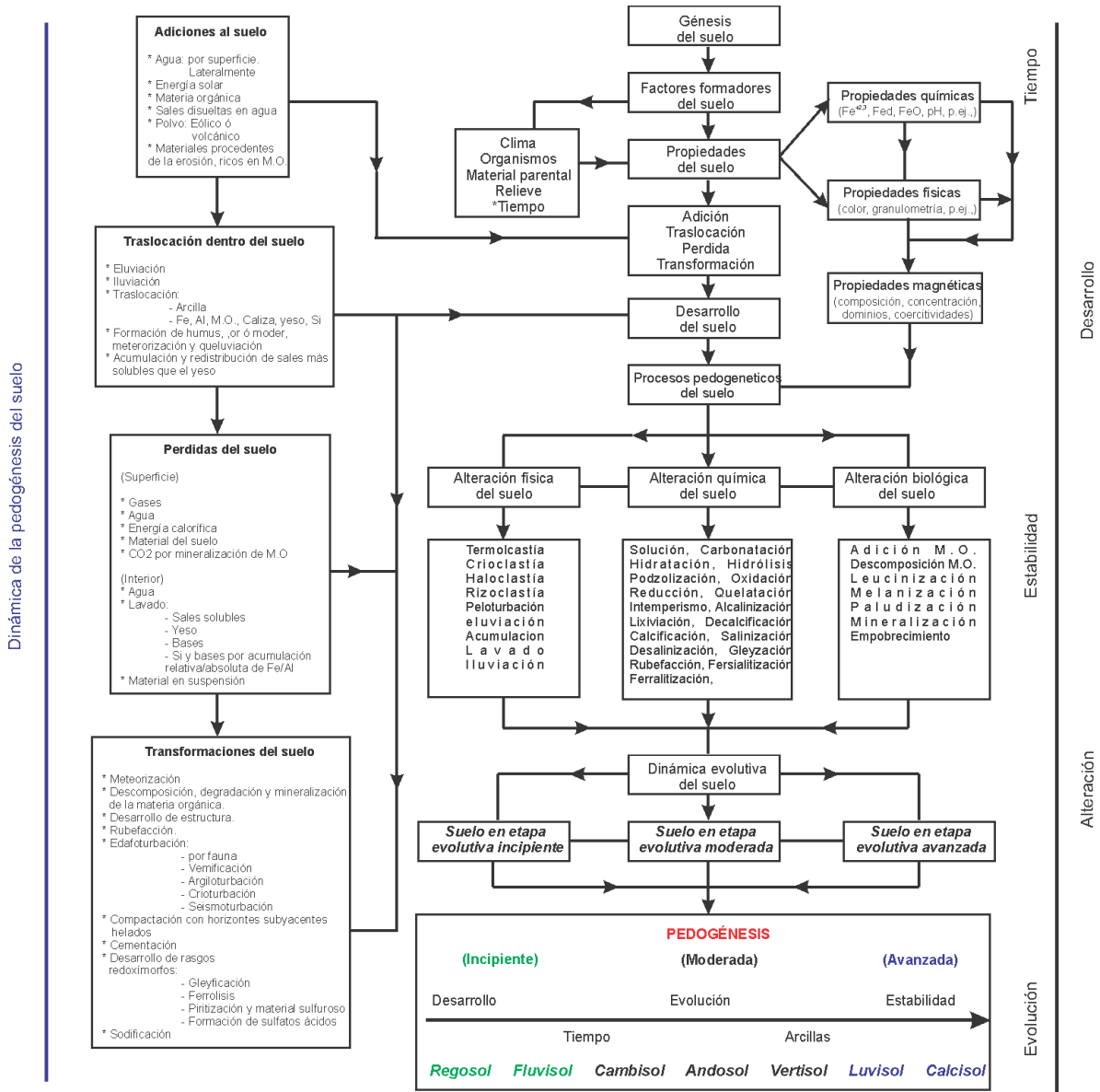


Figura 1.- Representación esquemática de la pedogénesis de un suelo y su dinámica. El esquema se construye tomado como base los trabajos de diversos autores (Dokuchaev, 1883; Jenny, 1941; Aswathanarayana, 1991; Porta y López, 1994; Buol et al., 2000; Bremenn y Buurman, 2002).

Recientemente estas técnicas magnéticas se han incorporado con mayor interés en diversos estudios arqueomagnéticos (*Soler et al., 2006; Herries et al., 2008; Gogichaisvilli et al., 2012*), de contaminación (*Chaparro, 2005; Basavaiah et al., 2012; Agustine et al., 2013*) de y física espacial (*Kletetschka et al., 2005; Chevrier et al., 2006; Bentley et al., 2009 y 2011*).

La aplicación de estos métodos en el estudio del suelo se enfocan en poder identificar y analizar la composición de su mineralogía a través de la caracterización de sus propiedades (concentración, tamaño de dominio y la dureza/coercitividad) de los granos magnéticos que están presentes en el suelo (*Thompson y Oldfield, 1986; Maher, 1986; Balsam et al., 2004; Geiss et al., 2008; Bijaksana et al., 2013*).

La mineralogía magnética está constituida principalmente por minerales que contienen hierro, cuarto elemento más abundante (5%) de la corteza (*Pilchin y Eppelbaum, 2006*), siendo éste uno de los elementos con mayor dispersión, por lo que se puede considerar que no existe un suelo que no lo contenga aunque sea en proporciones mínimas (*Besoain, 1985*). *Bodek y colaboradores (1988)* establecen que su contenido oscila entre el 0.05 y el 5%, y se encuentra dispersos en el suelo principalmente en forma de óxidos, hidróxidos, y silicatos (*Porta y López, 1994; Bikerland, 1999*) resultado de las variaciones en sus propiedades inherentes, como son su cristalinidad y termodinámica (*Cornell y Schwertmann, 2000*), lo que se ha utilizado como un indicador de la pedogénesis del suelo (*Schwertmann, 1985; Heck y Mermut, 1999; Acevedo et al., 2004*).

Desde su incursión en los estudios climáticos (p.ej., *Yao y Yu, 1989; Singer et al., 1992*), las técnicas magnéticas han contribuido exitosamente en la obtención de datos complementarios para investigaciones ambientales y de reconstrucción (paleo)-climática (*Banerjee, 1994; Reynolds y Kings, 1995; Liu et al., 2003; Vlag et al., 2004*) siendo útiles para determinar tasas de erosión y/o aridez (*Oldfield et al., 1978; Zhao et al., 2013; Li J., et al 2014; Jordanova et al., 2014*), realizar inferencias y correlaciones de las variaciones en el balance de precipitación/evaporación y el régimen hidrológico de los ríos (*Dearing y Flower, 1982*); analizar la humedad en secuencias de loess-paleosuelos (*Jordanova y Petersen, 1999; Liu C. et al., 2012; Hu et al., 2015*), en la identificación de cambios en la cubierta vegetal por variaciones climáticas (*Oldfield et al., 1983; Geiss y Banerjee, 1997*), para establecer modificaciones en redes fluviales (*Caballero y Ortega, 1998*), ó para determinar paleoprecipitaciones (*Florido et al., 1999; Balsam et al., 2011*) y paleodirecciones del viento (*Lagroix y Banerjee, 2002 a y b*), etc. Varios de estos trabajos se han concentrado primordialmente en establecer las relaciones entre las variaciones climáticas ocurridas durante el Cuaternario y la mineralogía magnética principalmente en diferentes secuencias de

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México.

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 1:
Introducción

suelos y paleosuelos, fundamentalmente de origen eólico (*Zheng et al., 1991; Bogalo, 1999; Geiss, 1999; Spassov, 2002*) en diversas regiones del mundo, donde los estudios de magnetismo de rocas han sido particularmente prometedores (*Terhorst et al., 2001; Sartori et al., 2005; Zhao y Liu, 2010*). Sin embargo, no obstante las ventajas operativas de estas técnicas magnéticas, su uso y contribución en diferentes registros que los avalan, la potencial fuente de información que constituye el suelo y la diversidad de suelos volcánicos del país, todavía resultan escasas las investigaciones en suelos de origen volcánico, incluso en México, en las que se realicen los estudios desde una perspectiva pedológica con enfoque ambiental en el que se lleve a cabo un análisis completo y detallado de sus propiedades magnéticas (*Rivas, 2003; Ortega et al., 2004*), por lo que aún no es del todo bien comprendida la dinámica de su pedogénesis, como lo han sido las secuencias de loess-paleosuelos (*Heller y Liu, 1984; Akram et al., 1998; Spassov et al., 2003; Liu C. et al., 2012b*) siendo estas interrogantes algunos de los motivos que fomentan la realización de la presente investigación.

1.1 Magnetismo Ambiental en Suelos Volcánicos Modernos en México

La presente investigación se enfoca en realizar un análisis detallado de diversos parámetros magnéticos en catorce perfiles de suelos volcánicos ubicados dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) desde una perspectiva pedológica/ambiental (**Figura 2**). Los suelos analizados se desarrollan bajo diferentes regímenes de precipitación y temperatura con diversos grados de evolución pedológica. Para su estudio, éstos se han agrupado en tres principales regiones (**Figura 2**): a) Región 1, suelos del valle de Teotihuacán, (VT), b) Región 2, suelos del Glacis de Buenavista, (GB), y c) Región 3, suelos del volcán Nevado de Toluca, (VNT).

De acuerdo con reportes previos, basados en los criterios de la clasificación de *IUSS Working Group, WRB (2006-2015)*, los perfiles analizados en el presente estudio muestran diversos grados de evolución (**Tabla 1**), que en su unidad pedogenética fundamental abarcan suelos en etapas incipientes (Fluvisol, Regosol), moderadas (Cambisol, Andosol, Vertisol) y avanzadas (Calcisol y Luvisol), respectivamente (*Cabadas, 2007; Solleiro et al., 2010; Díaz et al., 2011*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México.

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 1:
Introducción

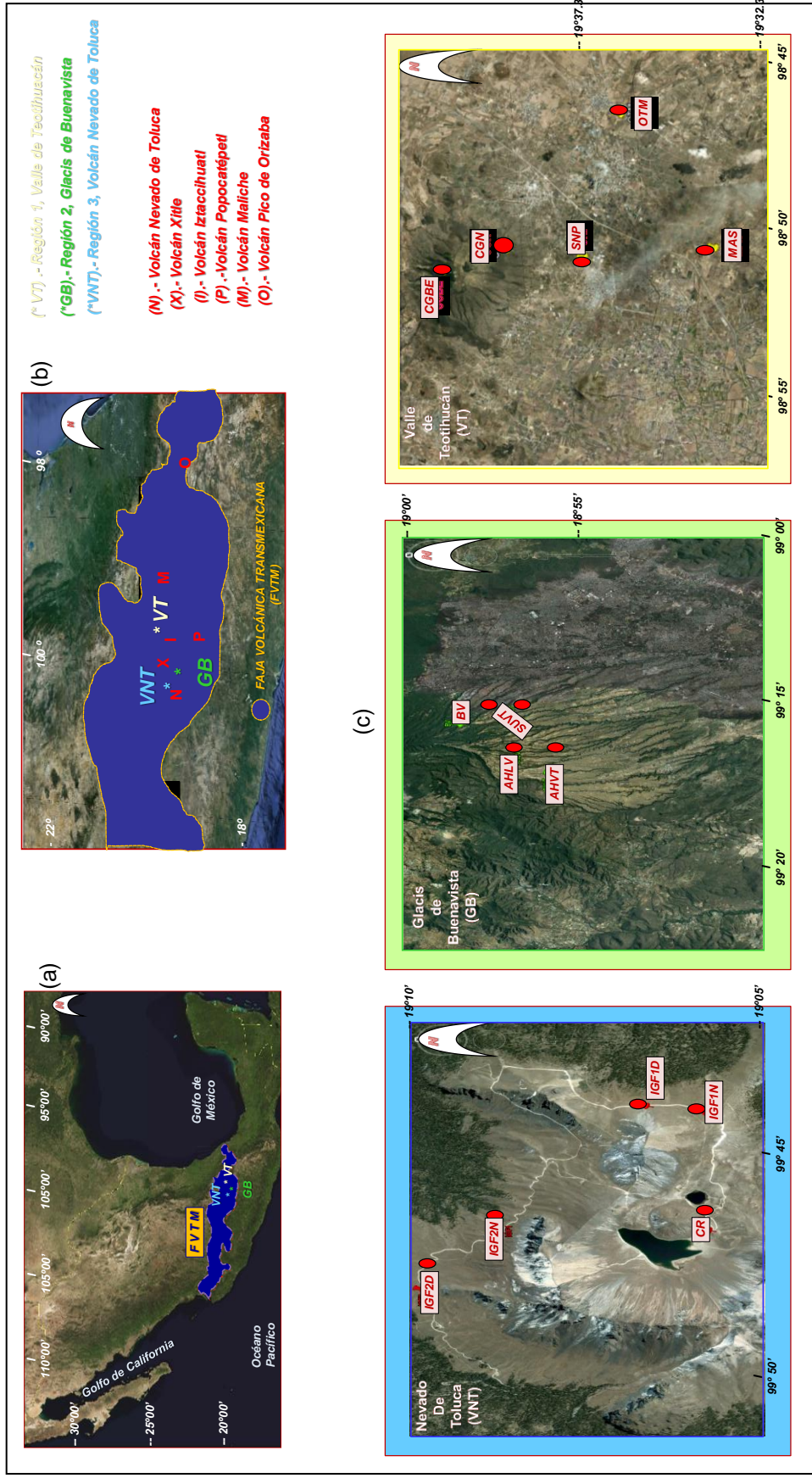


Figura 2.- Localización de las tres regiones principales en las que se han agrupado los suelos de este estudio. La figura está compuesta por: (a) la ubicación de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), (b) algunos de los volcanes más importantes de la Faja y las tres principales regiones de estudio, así como (c) la posición de los perfiles pedológicos dentro de cada una de ellas. La región 1, valle de Teotihuacán (VT), comprende los perfiles CGBE y CGN (Cambisoles), el perfil MAS (Calcisol), y los perfiles SNP y OTM (Fluvisoles) respectivamente. La región 2, Glacis de Buenavista (GB), abarca los perfiles BV (Andosol), AHLV (Luvisol), así como AHVT y SUVT (ambos Vertisoles). La región 3, volcán Nevado de Toluca (VNT), comprende los perfiles CR, IGF1N, IGF2N, IGF1D, IGF2D, todos ellos clasificados como Regosoles.

1.1.1 Justificación

El carácter ubicuo de los minerales magnéticos y la exitosa caracterización de sus propiedades como fuente de información en diferentes registros climático/ambientales (p.ej., estudios en secuencias de sedimentos lacustres y marinos), así como sus aspectos operativos (rapidez, poca infraestructura de muestreo, carácter No-destructivo, poca material para análisis, etc), entre otros atributos, están fomentando su incorporación como una herramienta complementaria para el estudio del suelo (*Jordanova et al., 2016; Ortega et al., 2015*).

El rápido incremento en años recientes por estudiar la mineralogía magnética del suelo ha derivado en la búsqueda de una continua renovación de perspectivas por llevarlo a cabo a través del estudio multifactorial e inter-paramétrico de sus propiedades. El uso de varios métodos y técnicas contribuye a tener una mejor comprensión de su composición y características, así como de su papel dentro del perfil pedológico como una potencial fuente de información incluso para una amplia gama de aplicaciones (p. ej., *Bentley et al., 2009; Aguilar et al., 2013; Soler et al., 2015*).

En el caso de las secuencias pedológicas (loess/paleosuelos) los estudios se han caracterizado, en su mayoría por tener un incremento magnético superficial, que ha permitido adquirir un mayor entendimiento de su dinámica para establecer su papel como fuente de información en los estudios climático/ambientales (*Bartel, et al., 2011; Quinton, 2011; Geiss, 2014*). En secuencias de suelos volcánicos todavía resultan ser escasas, comparativamente, las investigaciones que se han realizado (*Lu Sh., 2000; Lu Sh. et al., 2008; Ouyang et al., 2015*). No obstante, en México trabajos previos han comenzado a contribuir con la identificación de la mineralogía magnética de suelos volcánicos antiguos (etapas pedológicas moderadas y avanzadas), permitiendo caracterizar magnéticamente a sus horizontes con una firma magnética propia (ausencia de un aumento magnético superficial), que es diferente a la de secuencias eólicas, asociándose su origen con posibles procesos pedológicos vinculados a éstos (*Rivas, 2003; Ortega et al., 2004; Rivas et al., 2006*).

La diversidad pedológica del país establece una potencial oportunidad para poder analizar la capacidad de los suelos volcánicos para registrar evidencias de los cambios ambientales que se observan durante su formación y desarrollo dentro de los episodios de estabilidad del paisaje, y cuyas evidencias se llegan a preservar en sus horizontes y propiedades (*memoria del suelo*). De esta manera, la sensibilidad y resolución de la mineralogía magnética y sus propiedades permiten inferir información sobre el ambiente de formación relacionado con el desarrollo del suelo y su pedogénesis. Esto puede aportar valiosa información que sea de utilidad para las diversas

aplicaciones en suelos que se están desarrollando recientemente en el país, como son los estudios de contaminación (*Morton et al., 2009; Martínez, 2009; Aguilar et al., 2011 a y b; Aguilar et al., 2013; Bautista et al., 2014*), en investigaciones geoarqueológicas (*Borezja y Frederick, 2008; Solís, 2010; Cruz, 2011; Salcido, 2012; Solís et al., 2012; Sánchez, 2015*), trabajos pedológicos (*Díaz, 2008; Solleiro et al., 2010*), ó arqueomagnéticos (*Soler et al., 2015*) entre otras.

1.1.2 Hipótesis

Durante la pedogénesis del suelo, éste se somete a una continua y compleja transformación de sus componentes que origina cambios físicos, químicos y biológicos dentro de su perfil. Esto, además de influir directamente en las propiedades del suelo, contribuye a la configuración de sus horizontes, y también es responsable de regular la dirección evolutiva que puede alcanzar, lo cual se vincula fuertemente con las condiciones ambientales que prevalecen durante su formación.

El suelo de origen volcánico posee una composición, abundancia y distribución preferencial de la mineralogía magnética dentro de un perfil, lo que es dependiente de su grado evolutivo y la pedogénesis que éste ha alcanzado y del entorno en el que se forman. Evidencias de ello, se preservan en la *memoria del suelo*, en sus propiedades, así como en las características de las propiedades de la mineralogía magnética contenida en éste. Es decir, el desarrollo de los horizontes pedológicos, su composición y propiedades, así como la evolución de los suelos de origen volcánico son influenciados por las variaciones del entorno en el que se encuentran éstos, principalmente por el clima y el material parental (*Rivas, 2006*). De ahí que la variabilidad a profundidad que se registra en las propiedades de la mineralogía magnética, *perfiles magnéticos*, presente una estrecha relación con el desarrollo del suelo y sus condiciones formativas.

Por eso, a través del análisis selectivo y a detalle de varios parámetros magnéticos es posible poder establecer una señal propia y diferente, *pedogénesis magnética*, que caracterice al suelo volcánico en varias etapas de su pedogénesis. De esta forma con el análisis de los suelos volcánicos con un enfoque magnético/pedológico/ambiental puede contribuir a inferir posibles tasas de interacción de procesos y factores formadores de suelo, que se relacionan con las variaciones en aspectos ambientales (tasas de precipitación, temperatura, erosión, etc) para alcanzar una mejor comprensión de la mineralogía magnética de los suelos volcánicos y su dinámica. La firma de su pedogénesis magnética puede contribuir al aporte de información que pueda ser correlacionable con la amplia gama de aplicaciones que se están desarrollando sobre los registros pedológicos en México en años recientes.

1.1.3 Objetivos

Con el estudio de las propiedades magnéticas de suelos volcánicos modernos con diversos grados de desarrollo y etapas de evolución pedogenética diferentes, bajo distintas condiciones climáticas y ambientales actuales, se busca poder tener una mejor comprensión del efecto que tiene el clima en la mineralogía magnética y sus propiedades, resultado de la dinámica en la pedogénesis, de cada perfil. Para ello, se estudia la mineralogía magnética de los suelos de tres localidades (valle de Teotihuacán, Glacis de Buenavista, y Volcán Nevado de Toluca) dentro de la FVTM en diferentes etapas evolutivas que se desarrollan bajo diferentes regímenes de precipitación y temperatura para relacionarlas con el grado de desarrollo y evolución del suelo y poder establecer patrones de *pedogénesis magnética* que reflejen la firma que pueda caracterizar a cada fase de la memoria del suelo volcánico aquí estudiado y su vínculo con el entorno en el que se están formando.

1.1.3.1 Objetivos particulares

-Identificar la composición de las principales fases magnéticas que influyen en los suelos volcánicos.

-Caracterizar a detalle la mineralogía magnética de los suelos en función de la concentración, tamaño y espectro de coercitividades (dureza) de las partículas magnéticas presente en los perfiles de suelo.

-Determinar la interacción e influencia que tienen las condiciones ambientales en las propiedades de las partículas magnéticas.

-Identificar los mecanismos pedológicos responsables de las variaciones en las propiedades magnéticas de los suelos.

-Establecer patrones que relacionen las propiedades magnéticas y pedológicas de los suelos con las condiciones del entorno en el que se desarrollan los suelos.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 1:
Introducción

Tabla 1.- Características generales de la evolución pedológica de los suelos estudiados

Evolución	Características de formación	Tipo de perfil	Ambiente	Perfiles analizados	Ref
Regosol (VNT)	Son suelos que se desarrollan sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina	A C	Son muy comunes en zonas áridas, en los trópicos secos y en las regiones montañosas	CR IGF1N IGF2N IGF1D IGF2D	1,3
Fluvisol (VT)	Son suelos que se forman sobre depósitos aluviales. El material original lo constituyen depósitos, predominantemente recientes, de origen fluvial, lacustre o marino.	A C Presentan evidentes muestras de estratificación que dificultan la diferenciación de los horizontes, aunque es frecuente la presencia de un horizonte Ah muy conspicuo. Los rasgos redoximórficos son frecuentes, sobre todo en la parte baja del perfil	Aparecen sobre todos los continentes y cualquier zona climática	SNP OTM	1,2,3,4,6
Cambisol (VT)	Son suelos que se desarrollan sobre materiales de alteración procedentes de un amplio abanico de rocas, entre ellos destacan los depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial	A B C El horizonte B se caracteriza por una débil a moderada alteración del material original, por la ausencia de cantidades apreciables de arcilla, materia orgánica y compuestos de hierro y aluminio, de origen iluvial	Se forman sobre todas las morfologías, climas y tipos de vegetación	CGBE CGN	1,2,3,7,8,9
Andosol (GB)	Son suelos cuyo material parental lo conforman fundamentalmente cenizas volcánicas, pero también pueden aparecer sobre tobas, pumitas, lapillis y otros productos de eyección volcánica	A A C B C La rápida alteración de los materiales volcánicos porosos, provoca una acumulación de complejos organo metálicos estables con una elevada relación catión/anión. Los minerales formados están limitados a alofana, imogolita y ferrihidrita, principalmente	Se encuentran en áreas onduladas a montañosas de las regiones húmedas, desde el ártico al trópico, bajo un amplio rango de formaciones vegetales.	BV	1,3,5,9
Vertisol (GB)	Son suelos que se forman a partir de materiales con una elevada proporción de arcillas esmectíticas, o productos de alteración de rocas que las generen.	A B C La alternancia entre el hinchamiento y la contracción de las arcillas, genera profundas grietas en la estación seca y la formación de superficies de presión y agregados estructurales en forma de cuña en los horizontes subsuperficiales	Se desarrollan bajo un clima tropical, semiárido a subhúmedo o mediterráneo con estaciones contrastadas en cuanto a humedad	AHVT SUVT	1,3,10,11
Luvisol (GB)	Son suelos que se desarrollan principalmente sobre una gran variedad de materiales no consolidados como depósitos glaciares, eólicos, aluviales y coluviales.	A Bt C Sobre el horizonte árgico puede aparecer un álbico, en este caso son intergradados hacia los albelvisoles.	Predominan en zonas llanas o con suaves pendientes de climas templados fríos o cálidos pero con una estación seca y otra húmeda, como el clima mediterráneo.	AHLV	1,3,5,9
Calcisol (VT)	Son suelos calcáreos que contienen frecuentemente más de 15% de CaCO ₃ en el suelo que pueden ocurrir en distintas formas (pulverulento, nódulos, costras etc.)	A B C El horizonte superficial es érico, el B (cámbico, árgico e incluso vértico) está impregnado de carbonatos. En el C siempre hay una acumulación de carbonatos	Se encuentran en las zonas áridas, semi-áridas.	MAS	1,2,8,9

La tabla muestra la tipogénesis fundamental de los suelos analizados en el presente documento. Las columnas muestran de izquierda a derecha: El grado evolutivo fundamental y región de estudio (primera columna), una breve definición ó rasgo distintivo de cada etapa (segunda columna), el tipo de perfil o secuencia de horizontes teóricos que pueden desarrollarse en cada etapa y algún rasgo distintivo de éstos (tercer columna), el ambiente bajo los cuales se pueden desarrollar (cuarta columna), y el perfil de este estudio relacionado con cada etapa evolutiva (quinta columna). La tabla se construye tomando como referencia la información de trabajos previos (Porta y López, 1994; FAO). Para este trabajo, se considera que los Regosoles y Fluvisoles corresponden a etapas incipientes de evolución, mientras que los Cambisoles, Andosol y Vertisol se asocian con etapas moderadas. El Luvisol y Calcisol representan evoluciones avanzadas. Los suelos ó análogos a éstos, han sido estudiados previamente, p.ej., algunos de éstos son: (1) *Este documento*, (2), *Rivas et al., 2012*; (3) *Rivas, (2010)*; (4) *Solleiro et al., 2011*; (5) *Solleiro et al., 2003*; (6) *Rivera, 2007*; (7) *McClung de Tapia, 2005*; (8) *Cabadas, 2004*; (9) *Cabadas, 2007*; (10) *Díaz et al., 2010*; *Díaz et al., 2011* (11); entre otros.

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

ANTECEDENTES

“Valorar la fase conclusiva de la vida es todavía más necesario hoy, porque en la sociedad actual se trata de cancelar de todos los modos posibles el momento del tránsito”

*AMORIS LAETITIA
(Santo Padre Francisco)*

Capítulo 2

2 Antecedentes

Los suelos más estudiados por medio de los parámetros magnéticos (p.ej., registros de susceptibilidad magnética, χ) y analizados con una interpretación climático/ambiental son las secuencias de loess-paleosuelos (*Hus y Han, 1992; Sun et al., 1995; Foster y Heller, 1997; Balsam et al., 2004; Li G., et al., 2014*). La mayoría de éstas se han caracterizado por tener valores altos (χ) en la parte superficial (realce magnético superficial, RMS), mismos que tienden a decrecer hacia la parte inferior de dichas secuencias. Destacan las investigaciones realizadas en China (*Rixiang et al., 1999; Liu Q. et al., 2007; Xie et al., 2009; Oldfield y Bloemedal, 2011*), Europa (*Maher y Thompson, 1992; Sartori et al., 1999; Maher et al., 2003; Schneider et al., 2004; Jordanova et al., 2011a y b*), América del Sur (*Carter et al., 2006; Bidegain et al., 2009; Liu Q. et al., 2010b, Bartel et al., 2011*), y Norte América (*Fine et al., 1992; Grimley y Vepraskas, 2000; Grimley et al., 2004; Geiss et al., 2004 y 2008; Lindquist et al., 2011*). También están aquellas investigaciones realizadas en diversos perfiles de suelos eólicos modernos (*Cogoini et al., 2001; Lagroix y Banerjee, 2002a; Lagroix, 2004; Geiss y Zanner 2006 y 2007*) así como en suelos eólicos contaminados (*Kapicka et al., 2000 y 2001a y b; Chaparro, 2005 y 2006; Fialova et al., 2006; Orgeira et al., 2008*). De igual forma, en años recientes se han incrementado los estudios de parámetros magnéticos en secuencias de suelos volcánicos (*Rivas, 2003; Sangode y Bloemedal, 2004; Soubrand et a., 2009; Grison et al., 2014*; etc), aunque éstos aún resultan ser pocos comparativamente con respecto a las secuencias pedológicas de origen eólico.

2.1 Análisis de parámetros magnéticos en suelos.

Numerosos trabajos realizados en suelos que incorporan el uso de las propiedades magnéticas se basan únicamente en estudiar la susceptibilidad magnética como un *proxy* de las variaciones climáticas (*Terhorst y Ottner, 2003a y b; Retallack et al., 2003*). Sin embargo, este parámetro no sólo depende de la concentración de partículas ferrimagnéticas, sino también de la presencia de un amplio rango de minerales magnéticos, así como de la distribución del tamaño de las partículas magnéticas (*Dunlop, 1986; Maher, 1988*). De ahí que su interpretación rara vez es única y directa, por lo que las inferencias climáticas pueden verse comprometidas si no se han

caracterizado adecuadamente los componentes magnéticos (*Bloemedal et al., 1992; Geiss y Zanner, 2006*). Por tal motivo, frecuentemente se requiere de información adicional de otros parámetros magnéticos, así como de algunas propiedades de carácter no-magnético que complementen a estos registros y poder así ratificar o descartar la información obtenida a partir del registro de susceptibilidad para lograr así una acertada interpretación (paleo)-ambiental, como han sugerido diversos autores previamente (*Dearing et al., 1996b; Oorschot, 2001; Chaparro y Sintio, 2004*). Esta ambigüedad motiva que los estudios de propiedades magnéticas constantemente se encuentren desarrollando nuevos métodos e innovando los criterios y la manera de analizar e interpretar los parámetros magnéticos que se utilizan para determinar la composición y propiedades de los minerales magnéticos bajo diversas perspectivas (*France y Oldfield, 2000; Liu Q., et al., 2012; Liu Z. et al., 2013; Jiang et al., 2014; Maxbauer et al. 2016*).

La mayoría de los estudios magnéticos realizados en diversas secuencias de loess-paleosuelos y suelos eólicos del planeta se han caracterizado por tener un aumento magnético (RMS) (*Singer et al., 1996; Hus y Geeraerts, 1999; Sun y Liu, 2000; Zan et al., 2010; p.ej.,*). Aunque es un rasgo relativamente común en la mayor parte de estos suelos, todavía no son totalmente claros los mecanismos que originan dicho aumento, debido a que en gran parte de éstos reportes tienden a tratar de explicarlo por perspectivas separadas y no en su conjunto.

Es decir, por un lado están los trabajos pedológicos que incursionan en el magnetismo ambiental, donde se desarrolla un estudio completo de las propiedades de físicas y químicas del suelo, pero en los que regularmente solo se analizan los registros de χ con el objetivo de poder relacionarlos con algunas propiedades del suelo (*Terhorst y Ottner 2003b; Sumegi et al., 2004; Porsch et al., 2014*). Por otra parte, se encuentran los estudios de magnetismo ambiental que se adentran en los suelos como registro por estudiar, en los que se desarrollan análisis completos de los parámetros magnéticos, donde se logra caracterizar la mineralogía magnética (*Dodonov et al 2002; Deng et al., 2004; Fialova et al., 2006; Liu et al., 2012*), pero que suelen explicar sus propiedades magnéticas como el resultado de la pedogénesis del suelo, lo cual puede resultar en ocasiones ambiguo, dada la complejidad de lo que constituye la pedogénesis de un suelo (**Figura 1, p.ej.,**) como lo reportan y enfatizan diferentes autores (*Dearing et al., 1996; Singer et al., 1996; Maher, 1998*).

Entre los primeros trabajos que reportaron este incremento superficial de la susceptibilidad magnética (χ) se encuentran los trabajos de *Le Borgne (1955, 1960)* quien estableció que su origen se debe a la formación de magnetita (Mgt) producto de la quema de suelos. Posteriormente fue

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 2:
Antecedentes

interpretado como un producto de mecanismos naturales como incendios, la fermentación ó calentamiento del suelo, la combustión de materia orgánica, la actividad biológica y microbiana, y el tipo de cubierta vegetal (*Tite y Linington, 1975; Logworth et al., 1979; Fassbinder et al., 1990; Lu et al., 2001*), por condiciones ambientales (*Kukla, 1988; Fine y Singer, 1989; Fine et al., 1995; Feng et al., 2004*) ó por la actividad antrópica, como lo es la contaminación del suelo (*Maier y Scholger, 2004; Gautam, et al., 2005; Schmidt et al., 2005*). Reportes como los de *Maher (1986)*, así como *Maher y Thompson (1995)* constituyen de los primeros estudios que correlacionan las características pedológicas de un suelo con el análisis de los parámetros magnéticos, estableciendo conceptos como la susceptibilidad pedológica, (χ_{ped}) ó la susceptibilidad *básica* (χ_{bg}) definida previamente por Foster y colaboradores (*1994*), que incluso en trabajos posteriores (*Maher et al., 2002; Geiss et al., 2005*) comenzaron a estudiar cuantitativamente.

Otros estudios establecen que el realce magnético superficial de los suelos se debe a un incremento de granos ferrimagnéticos (magnetita, Mgt y/o maghemita, Mgh) de dominio SP a SD, (*Maher, 1986; Heller y Evans, 1995; Hunt et al., 1995*) como resultado de la formación in situ de óxidos de hierro debido a la génesis del suelo (*Maher y Taylor, 1988*); ó debido a una acumulación preferencial de minerales litogénicos (*Fine y Singer, 1989*). Este aumento magnético también ha sido utilizado como fuente de información para reconstruir las condiciones paleoclimáticas durante la formación de los suelos (*Heller et al., 1991; Verosub et al., 1993; Zan et al., 2011*). Igualmente se ha interpretado como una consecuencia del grado de pedogénesis del suelo y sus efectos (*Oches y Banerjee, 1996; Fine et al., 1995; Banerjee, 1996; Geiss, 1999; Rivas, 2010*), como un incremento de fases magnéticas duras en terrazas del Plio-Pleistoceno y Holoceno (*Bogalo, 1999*), ó como resultado del tipo de suelo estudiado y el cambio dentro de los factores formadores suelo (*Lu, 2000*). En los últimos años se ha relacionado este aumento de susceptibilidad con la humedad que presenta el suelo, la cual puede controlar la producción pedogenética o destrucción de los minerales magnéticos (*Liu et al., 2003*) como resultado de un incremento de partículas tanto ferrimagnéticas y antiferrimagnéticas (*Geiss et al., 2004*), el contenido de partículas contaminantes dentro del suelo (*Chaparro, 2005 y 2006*), o por la transformación de minerales paramagnéticos y/ó antiferrimagnéticos a fases ferrimagnéticas (*Geiss y Zanner, 2007*).

Aunque varios autores han comenzado a caracterizar magnéticamente diferentes etapas y asociaciones evolutivas de suelos, continúan siendo aún sus investigaciones predominantemente en secuencias de origen eólico, donde destacan los trabajos realizados en asociaciones de suelos con diversas evoluciones como en Oxisoles (*Resende et al., 1986; Peluco et al., 2013*); Kaztanozems

(Maher *et al.*, 2003); Latosoles (Bijaksana *et al.*, 2013; Ananthapadmanabha *et al.*, 2014; Ouyang *et al.*, 2015); Chernozems (Jordanova *et al.*, 2014; Jaksika *et al.*, 2015); Chernozems y Podzoles (Rankey y Farr, 1997; Virina *et al.*, 2000; Gorka *et al.*, 2016); en Podzoles, Cambisoles, y turbiditas, (Kapicka *et al.*, 2003); Inceptisoles, Molisoles, (Liu *et al.*, 2010a; Feng *et al.*, 2004; Torrent *et al.*, 2010); Histosoles (Sokolowska *et al.*, 2016); en Cambisoles, Planosoles, Gleysoles, Luvisoles, Fluvisoles y Podzoles (Faviola *et al.*, 2006); Chernozems, Feozems y Luvisoles (Jordanova *et al.*, 2010; Jordanova *et al.*, 2014); Planosoles y Alisoles (Jordanova *et al.*, 2011); en suelos arcillosos (Liu *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014); suelos desarrollados a partir de rocas calcáreas (Vodyanitskii; 2010; Lu *et al.*, 2012); Luvisoles Cálcidos (Liu Q. *et al.*, 2016), ó en Vertisoles (Fisher *et al.*, 2008; Linquist *et al.*, 2011; Jordanova y Jordanova, 2016). En ellos, además de reportar el aumento magnético característico de este tipo de suelos eólicos, también han comenzado a registrar su ausencia, incluso en suelos ubicados en la misma región.

Algunos otros reportes sobre minerales magnéticos asocian la ausencia y existencia del aumento superficial en la susceptibilidad magnética con la transformación de fases magnéticas estables y poco cristalizadas, como lepidocrocita (Lpc) y ferrihidrita (Ferr) (Gehring y Hoffmeister, 1994; Dearing *et al.*, 1996b; Jordanova *et al.*, 1997; Morris *et al.*, 1998; Mitov *et al.*, 2002).

2.2 Magnetismo de rocas aplicado en suelos volcánicos

En los últimos años se han comenzado a realizar estudios más detallados de los parámetros magnéticos en suelos diferentes a las secuencias de loess-paleosuelos (Rivas, 2010; Ouyang *et al.*, 2015; Barceinas, 2015). Lu (2000) reporta una clara diferenciación entre los registros de susceptibilidad magnética en los suelos que se desarrollan a partir de diferentes materiales parentales y bajo condiciones subtropicales en China. El autor determinó que esto se debe a la fuerte influencia que reciben los suelos del material parental, donde las rocas ígneas básicas (RIB) tienen los valores más altos. Para los suelos desarrollados a partir de rocas ácidas (RIA) y neutras muestran valores que oscilan entre una quinta parte y la mitad de la intensidad de las rocas básicas respectivamente, mientras que los suelos desarrollados a partir de rocas sedimentarias, éstos tienen los valores más bajos, presentando un aumento en χ en la parte superficial que se asocia con los tamaños de grano de las partículas magnéticas originado por la pedogénesis de estos suelos.

En México, Rivas (2003) reporta la ausencia de un aumento magnético superficial en un estudio realizado en perfiles de suelos volcánicos antiguos con diferente evolución en los

alrededores del Nevado de Toluca. En su estudio señala que el material parental de los suelos son rocas ígneas ácidas (RIA), cuyas propiedades magnéticas son controladas por el tamaño de partículas magnéticas predominantemente los granos PSD de composición Ti(Mg) ricas en Ti, en su mayoría.

También sugiere que la ausencia de un aumento en χ superficial se debe a que en las propiedades magnéticas de estos horizontes existe la neoformación, por pedogénesis, de las partículas magnéticas, la cual no es mayor que la cantidad que existe en el material parental.

En un estudio de magnetismo ambiental realizado en una secuencia de paleosuelos volcánicos, *Ortega y colaboradores (2004)* establecen que éstos son un indicador de condiciones paleo-ambientales en el que existen evidencias de neo-formación de fases magnéticas ultrafinas derivadas de los procesos pedogenéticos. Los autores determinan que bajo condiciones reductomórficas y un clima húmedo, hay una destrucción de partículas ultrafinas (SP), lo que contribuye a la ausencia de un aumento magnético superficial en los perfiles que estudiaron. Ellos también concluyen que los cambios que se presentan en los parámetros magnéticos son el resultado de las variaciones que ocurrieron durante el desarrollo de los suelos debido a los procesos pedogenéticos.

Sangode y Bloemedal (2004) reportan que en paleosuelos del Himalaya los cambios registrados en los parámetros magnéticos se deben a variaciones en el ambiente del suelo, al pasar de condiciones cálidas y húmedas en el Plioceno, a condiciones secas, oxigenadas y más frías en el Pleistoceno, e influyendo así en la pedogénesis. De acuerdo con los autores esto resalta el hecho de que la susceptibilidad magnética (χ) por sí misma no es un parámetro concluyente para realizar una interpretación ambiental como otros autores lo han establecido.

En un estudio comparativo entre paleo-Luvisoles de origen volcánicos antiguos de Tlaxcala y eólicos de Austria y Rusia, *Rivas (2006)* determina que el material parental, clima y relieve son los principales factores formadores de suelo que influyen en la composición y dinámica de la mineralogía, así como en su tamaño de partícula magnética. Resalta también la falta de un aumento superficial (χ) en el suelo volcánico, lo que interpretó como una mayor influencia litogénica con respecto a las tasas de neo-formación de partículas magnéticas. Además establece que la distribución de tamaños de partículas magnéticas es controlada por la destrucción de granos finos por pedogénesis en el material litogénico, lo que favorece que en la parte superficial exista un mayor contenido de partículas ultrafinas, como resultado de la alteración y oxidación de los granos finos. En el mismo trabajo, reporta que dentro de una misma localidad existen variaciones en los

parámetros magnéticos entre muestras colectadas en una estación seca y una húmeda, reflejando una posible mayor sensibilidad de estos parámetros (sobre técnicas no magnéticas) con una mayor tasa de lavado, eluviación/iluviación bajo las condiciones actuales.

Posteriormente, *Rivas y colaboradores (2006)* establecen que para paleosuelos con la misma evolución pedológica fundamental, pero diferente origen (eólico y volcánico), pueden reflejar comportamientos magnéticos diferentes, como resultado del material parental y procesos pedogenéticos diferentes. Los autores también señalan que en paleosuelos volcánicos puede llegar a presentarse un aumento de partículas finas como resultado de la formación de minerales, y sin embargo no tener un realce magnético superficial, debido a una tasa de neo-formación que no alcanza a compensar la pérdida de minerales litogénicos en ningún horizonte.

En *2008, Lu y colaboradores* reportan la presencia y ausencia de un realce magnético en suelos desarrollados a partir de basaltos en China y determinan que la susceptibilidad magnética puede no reflejar el grado de evolución de un suelo. En el mismo trabajo establecen que las propiedades magnéticas de los perfiles son controladas por partículas ferrimagnéticas ultrafinas y una mineralogía magnética dominada por magnetita (Mgt) y maghemita (Mgh) que asocian con el incremento de los óxidos de hierro secundarios (como hematita, Hmt) producto de la pedogénesis del suelo, concluyendo también que $\chi_{fd\%}$ puede ser una potencial herramienta para inferir el grado de alteración de un suelo.

Sangode y colaboradores (2008) utilizan el análisis de parámetros magnéticos como una herramienta para estudiar diversos procesos pedológicos en diferentes secuencias de paleosuelos en el Himalaya. Ellos concluyen que la disminución en el registro de susceptibilidad se debe a la transformación del material parental a fases magnética de mayor dureza magnética, mientras que en suelos modernos las partículas magnéticas duras se transforman a granos ferrimagnéticos. También establecen que bajo un ambiente en el que predominan las partículas antiferrimagnéticas, la susceptibilidad magnética no es suficiente para caracterizar un ensamble de minerales magnéticos.

De acuerdo con el reporte de *Soubrand y colaboradores (2009)*, el aumento que se registra en los parámetros magnéticos de suelos desarrollados bajo condiciones templadas en Francia, se debe a la presencia de materiales magnéticamente duros y/o la adición e interacción de la materia orgánica dentro del suelo. Esto como resultado del aumento de oxígeno durante el proceso de maghemitización que altera a los óxidos de hierro y titanio presentes en el suelo.

Rivas y colaboradores (2012), presentan datos parciales del análisis de parámetros magnéticos obtenidos en suelos volcánicos en el valle de Teotihuacán, y reportan que las

diferencias en las propiedades magnéticas encontradas se deben a modificaciones en las condiciones ambientales (p.ej. relieve, edad y cubierta vegetal), así como el grado de pedogénesis de cada perfil lo que influye en la composición, concentración, distribución y aporte de las partículas magnéticas dentro de cada perfil.

Recientemente *Grison y colaboradores (2014)* establecen una relación directa entre las propiedades magnéticas y geoquímicas de suelos volcánicos enriquecidos en óxidos de hierro en Francia. Los autores establecen que existe una estrecha y directa correlación de la estabilidad de los minerales de hierro con la susceptibilidad magnética. Esto como resultado de una mayor influencia de la humedad y el intemperismo del suelo con respecto al material parental, así como con la edad de éste. También establecen que la conjunción de una alta tasa de precipitación e incluso una temperatura variable, contribuye a una óptima acumulación de partículas magnéticas en el suelo.

En un reporte reciente realizado sobre suelos rojos tropicales desarrollados a partir de basaltos en China (*Ouyang et al., 2015, en prensa*) analizan la formación y pedogénesis progresiva del suelo a partir de diversas etapas de intemperismo del material parental bajo un clima húmedo/tropical. Los autores concluyen que el intemperismo de éste origina un incremento de ferrimagnéticos secundarios finos producto de una mayor tasa de maghematización/hematización, lo que se refleja en un ensamble heterogéneo de minerales magnéticos compuesto principalmente de Ti(Mgh) que coexiste con Mg-Mgh de origen pedogénico.

Barceinas (2015) realiza el estudio de parámetros magnéticos en secuencias edafosedimentarias y reporta una relación directa entre el dominio de las partículas magnéticas y el grado de desarrollo del suelo, análogo a reportes previos (*Kapicka et al., 2003; Jordanova et al., 2010; etc*). También establece que la diferencia en la concentración de ferrimagnéticos se debe al cambio en la actividad antrópica que permite diferenciar entre el uso agrícola que se hace del suelo, de la construcción de cerámica.

Recientemente, *Sánchez (2015)* lleva a cabo un estudio en suelos antiguos en el valle de Teotihuacán en donde a través del análisis de propiedades físicas y químicas determina el rol de la pendiente del suelo como registro de ciclicidad de etapas de formación, siendo menor su frecuencia en regiones con mayor pendiente. También señala que los altos valores de susceptibilidad magnética se deben a la influencia del material volcánico contenido en el suelo (amorfo), lo que relaciona con el alto contenido de arcilla y materia orgánica (~coloración del suelo), en respuesta a procesos de eluviación, carbonatación, rasgos vérticos y redox.

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

METODOLOGÍA

“Si no cultivamos la paciencia, siempre tendremos la excusas para responder con ira a las agresiones... La paciencia se afianza cuando se reconoce que la otra persona también tiene derecho a vivir en esta Tierra junto a uno, así como es. No importa si es un estorbo, ó si altera los planes, si molesta con su forma de ser ó con sus ideas, si no es todo lo que esperabas”

AMORIS LAETITIA
(Santo Padre Francisco)

Capítulo 3

3 Metodología

El análisis de los parámetros de magnetismo ambiental en suelos se enfoca en llevar a cabo un estudio de los minerales magnéticos (**Tabla 2**) presentes en el perfil pedológico, su composición, propiedades y transformaciones (**Apéndice**), para poder caracterizar magnéticamente a cada horizonte de éste (**Tabla 3**). Para ello, también es necesario realizar el análisis de otras propiedades *no-magnéticas* que ayuden a tener un mejor y más completo entendimiento de la mineralogía magnética y su papel dentro del suelo como registro de su evolución y desarrollo.

Tabla 2.- Procesos de formación y alteración de los minerales magnéticos

Mineral	Formación	Temperatura de transición	Transformación
<p><i>Titanomagnetita</i> $Fe_{3-x}Ti_xO_4$ Ti(Mgt) Sistema Cúbico</p>	<ul style="list-style-type: none"> *Procesos magmáticos. *Oxidación a bajas temperaturas. *Alteración hidrotermal a temperaturas 200°C<T. 	580 °C y -153°C TM60=150°C, TM45=260°C, TM30=350°C, TM15=460°C, TM0=575°C, 153-578°C.	Ti(Mgh) Ti(Hmt)
<p><i>Titanomaghemita</i> $xFeTiO_3 \cdot [1-x] Fe_2O_3 \cdot Ti$ (Mgh) Sistema Cúbico</p>	<ul style="list-style-type: none"> *Producto por solución solida de Ti(Mg). *Alteración hidrotermal 200°C<T. 	350°C	Ti(Hmt)
<p><i>Titanohematita</i> (Haemo-ilmenita) $Fe_{3-2y}^{2+} Ti_y^{4+} O_3^2$ Ti(Hmt) Sistema Ortorómbico</p>	<ul style="list-style-type: none"> *Asociado con rocas plutónicas, rocas metamórficas, ó estratos rojos. 	-100°C y 200°C 675°C a -200°C 218-675°C	
<p><i>Magnetita</i> Fe_3O_4 Mgt Sistema. Cúbico</p>	<ul style="list-style-type: none"> *Reducción de Mgh con materia orgánica (M.O.) *Deshidratación de Gth. *En rocas ígneas y metamórficas. *Asociado con granates y Px. *Segregación magmática. *Oxidación a bajas temperaturas. *Reducción. *Hidratación. 	580°C	Mgh Hmt Pyrr Lpc
<p><i>Maghemita</i> Fe_2O_3 Mgh Sistema Cúbico</p>	<ul style="list-style-type: none"> *Oxidación a bajas temperaturas de Mg. *Alteración de Lpc. *Reducción Lpc sin M.O. *Por efecto endotérmico de Ferr. *Inversión. *Reducción de M.O. *Deshidroxilación hidrotermal de Gth, ó Lpc 	300-400°C, 300-560°C, 640°C.	Hmt Mgt
<p><i>Hematita</i> Fe_2O_3 Hmt Sistema Ortorómbico</p>	<ul style="list-style-type: none"> *Alto Eh y pH de moderado a alto. *Por reducción de M.O y Mgh. *Alta temperatura, pH entre 7-8, poca humedad y M.O. *Asociado con rocas magmáticas. *Deshidroxilación termal, mecánica ó hidrotermal de Gth. 	680-690°C 650-725°C	Mgt

La tabla presenta algunos de los minerales de hierro que se pueden encontrar dentro de un suelo. De izquierda a derecha, se presenta: el nombre del mineral magnético, nomenclatura, fórmula química general y sistema cristalográfico (primera columna). Después, se muestran algunas de sus condiciones y temperaturas de formación (segunda y tercera columna), así como varios mecanismos y productos de su transformación (cuarta columna). La información de toma de diversas fuentes (*O'Really, 1984; Dunlop y Ozdemir, 1997; Cornell y Schwertmann, 2000*; entre otros).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 3:
Metodología

Tabla 2.- (Continuación)

Mineral	Formación	Temperatura de transición	Transformación
<i>Goethita</i> αFeOOH Gth Sistema Rómbico	*Por oxidación a bajas temperaturas en sulfuros de hierro, nódulos de manganeso. *Como precipitado inorgánico o biogénico en agua. *Por la acumulación de un gel amorfo hidratado con el tiempo. *Meteorización de los minerales de hierro. *Por síntesis de minerales No-magnéticos. *Condiciones húmedas y ácidas. *Rápida alteración de silicatos y carbonatos de hierro. *Acumulación prolongada de gel amorfo e hidratado. *Alta temperatura, poca humedad, poca M.O., pH entre 7-8. *Disolución/Reprecipitación de Lpc	80 120 150 220-250	Hmt Mgh
<i>Lepidocrocita</i> γFeOOH Lpc Sistema Ortorómbico	*Se le asocia con Gth. *bajo condiciones de alta precipitación y pobre drenaje. *Producto del intemperismo de los minerales ricos en Fe, en especial de los sulfuros y óxidos. *Alta precipitación y un pobre drenaje del suelo.	220	Mgh Mgt Hmt Gth
<i>Gregita</i> Fe_3S_4 Greg Sistema Cúbico	*Bajo condiciones anóxicas. *por la acción biológica de organismos como las bacterias magnetotáticas, en ambientes marinos. *Sedimentos tipo <i>salt marsh</i> , estratificaciones de <i>salt ponds</i> y en cuencas de estuarios.	320	
<i>Pirrotita</i> (FeS), (Fe_2S_3) Pyrr Sistema Hexagonal/Monoclínico	*En rocas ígneas básicas	325°C	
<i>Pirita</i> FeS_2 Pyr Sistema Cubico			Lpc Mgt
<i>Ilmenita</i> TiO_3Fe Ilm Sistema Hexagonal	*Rocas ígneas. *Segregación magmática. *Rocas metamórficas cristalinas.	60K< < 60K	Mgt
<i>Ferridrita</i> $\text{Fe}^3\text{SO}_3(\text{OH})_9$ Ferr Amorfo	*Efecto endotérmico *Deshidratación	220°C	Mgh Hmt Gth Akg, Lpc
<i>Siderita</i> FeCO_3 Sid Sistema Hexagonal	*De la transformación de soluciones sólidas con magnesita a óxidos u hidróxidos dependiendo de las condiciones de formación	400-550	Mgt Gth Mgh

3.1 Selección del área de estudio

El criterio de selección de las regiones y localidades de la investigación se basó principalmente en tres aspectos: 1) Considerar suelos localizados dentro de zonas con productos volcánicos, como material parental; 2) Tener suelos de regiones con diferentes regímenes climáticos (precipitación y temperatura) dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM); y 3) Relacionar perfiles que estén desarrollando diferentes grados evolutivos, abarcando etapas con evolución incipiente, moderada y avanzada. La mayor parte de las secuencias de esta investigación han sido estudiadas previamente de manera exhaustiva con diversas perspectivas a través de estudios de sus propiedades no-magnéticas por medio de diferentes métodos y técnicas (*Sarabia et al., 2002; Cabadas 2004 y 2007; Díaz et al., 2010; Solleiro et al., 2011*; entre otros).

3.2 Trabajo de campo

En una sección fresca del perfil pedológico, se delimitaron los horizontes y se colectó 400 g aproximadamente de suelo a intervalos de 0.05 m. Cuando las condiciones del medio no lo permitieron, se abrió el muestreo a cada 0.1 m. De esta manera, la profundidad mínima de los suelos estudiados es de 0.3m y la máxima de 1.2m, esto debido a las características de cada localidad que controlan el desarrollo de cada suelo y reflejan las condiciones del entorno. Es decir, que pueden presentar un escaso desarrollo (p.ej., horizontes eluviales ó transicionales), ó su coexistencia con paleosuelos formados con una pedogénesis diferente que fue controlada por condiciones ambientales distintas y que se han sido analizados previamente (*Cabadas, 2004 y 2007; Rivera, 2007; Díaz, 2008*; etc).

3.3 Trabajo de laboratorio

3.3.1 Propiedades magnéticas

Para poder realizar el estudio de las propiedades magnéticas de los suelos, las muestras de éstos se secaron a una temperatura de 40 °C durante 24 horas, en un horno Shel lab con procesador, modelo CE3F/CE5F. Después, fueron cuarteadas, homogeneizadas y encapsuladas en cubos de acrílico de 8 cm³, en los cuales se realizaron la mayoría de las mediciones de los parámetros magnéticos (**Tabla 3**). Entre mediciones, las muestras fueron resguardadas dentro de un blindaje magnético, para evitar que éstas adquieran una magnetización remanente viscosa.

Primero se midió la susceptibilidad magnética, expresada en masa, en bajas (χ , 0.47 kHz) y altas (χ_h , 4.7 kHz). Posteriormente se midieron las magnetizaciones anhistórica remanente (ARM) así como la isothermal remanente (IRM). Se consideró que la magnetización isothermal remanente de saturación (SIRM_{1T}) corresponde a la impartición de un pulso electromagnético de 1T.

Por otro lado, se midieron los cambios de susceptibilidad magnética durante el proceso de calentamiento y enfriamiento (experimentos de k vs. T) ya que a partir de ello se utilizan para establecer las temperaturas de Curie (T_C) y/o Neel (T_N), mismas que son de utilidad para identificar las principales fases mineralógicas (**Tabla 2, Apéndice**).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 3:
Metodología

Tabla 3.- Sinopsis de parámetros magnéticos
Definición/Ortención/Instrumentación

Parámetros Magnéticos	Definición/Ortención/Instrumentación	Contribución/Influencia
Magnetización (M)	Es la capacidad de orientación de la densidad de momentos magnéticos por unidad de volumen de un material, producto del movimiento de sus spins. <i>Instrumentación:</i> Magnetómetros	
Susceptibilidad (χ)	Es el grado de relación entre la magnetización inducida de un material en respuesta a la intensidad un campo magnético aplicado. Se mide en bajas (0.47 KHz) y altas (4.7 KHz) frecuencias, y se normaliza por la densidad de la muestra (ρ) para expresar la susceptibilidad en unidad masa (χ _m) y/6 por su volumen (χ _v) respectivamente. <i>Instrumentación:</i> Susceptíbilmetro Bartington MS2, Sensor dual MS2B.	<i>Concentración</i>
Δχ	Inferencia sobre el grado de magnetización de un material, considerando el aporte de ferrimagnéticos. Se obtiene a partir de la diferencia entre la susceptibilidad magnética en bajas y altas frecuencias, normalizada cada una por la densidad de la muestra del suelo analizada <i>Instrumentación:</i> Susceptíbilmetro Bartington MS2, Sensor dual MS2B.	<i>Concentración</i> Paramagnéticos Ferrimagnéticos
Magnetización Natural Remanente (NRM)	Es la suma de todas las posibles componentes de la magnetización adquirida bajo condiciones naturales que es dependiente de las condiciones de formación de las rocas así como de las propiedades y características de los minerales magnéticos. <i>Instrumentación:</i> Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	<i>Concentración</i> Minerales magnéticos Ferromagnéticos Ferrimagnéticos Paramagnéticos
Magnetización Ahistérica Remanente (ARM)	Es una magnetización artificial adquirida en el laboratorio a través de la aplicación de un campo directo constante (50 Oe) sobre impuestro a un campo alterno decreciente que fluctúa entre 0 y 100 mT. <i>Instrumentación:</i> P.A.R.M. Molspin Limited, Desmagnetizador Molspin, Schonstedt GSD-1, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	<i>Concentración</i> Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos SD-SD,SSD
Magnetización Isotermal Remanente (IRM)	Es una magnetización artificial adquirida en el laboratorio por medio de pulsos electromagnéticos durante períodos cortos de tiempo, en campos directos a intervalos discretos que oscilan entre 5 y 1000 mT a temperatura ambiente. <i>Instrumentación:</i> Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	<i>Concentración</i> Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos
Magnetización Isotermal Remanente de Saturación (SIRM_{1T})	Es una magnetización artificial adquirida en el laboratorio. Se obtiene a través de un pulso electromagnético (IRM) aplicado a un campo alto, directo p.ej., 1000mT. <i>Instrumentación:</i> Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	<i>Concentración</i> Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos
Coercitividad (H_c)	Es el campo necesario para que la magnetización de una partícula magnética sea nula. <i>Instrumentación:</i> Magnetómetro Vibrating Sample Magnetometer (VSM-nuevo Molspin)	<i>Concentración</i> Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos
Coercitividad Remanente (H_{cr})	Es el campo inverso que al ser suprimido, deja a la partícula magnética desmagnetizada. <i>Instrumentación:</i> Magnetómetro Vibrating Sample Magnetometer (VSM-nuevo Molspin).	<i>Concentración</i> Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos
Magnetización Remanente (M_s)	Es aquella que conserva una partícula en ausencia de un campo aplicado. <i>Instrumentación:</i> Magnetómetro Vibrating Sample Magnetometer (VSM-nuevo Molspin).	<i>Concentración</i> Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos
Magnetización Remanente de Saturación (M_{ss})	Es la que adquiere una partícula de manera espontánea cuando se le aplica un campo alto. <i>Instrumentación:</i> Magnetómetro Vibrating Sample Magnetometer (VSM-nuevo Molspin).	<i>Concentración</i> Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos

La tabla presenta la síntesis de la interpretación de los parámetros magnéticos. De izquierda a derecha, la primera columna denota el parámetro magnético y/6 su interacción/comparación, así como sus siglas en inglés. La segunda columna corresponde con una breve definición de cada parámetro magnético, su metodología así como el equipo utilizado para la medición. La tercer columna indica la contribución/información que se puede inferir/interpretar de los parámetros magnéticos. La cuarta magnética está vinculada con el espectro de coercitividades de manera que un mineral de baja coercitividad se considera magnéticamente suave, así como uno duro corresponde a uno de alta coercitividad respectivamente. La tabla se construye con información de trabajos diversos (p.ej., Thompson y Oldfield, 1986; Dearing, 1994; Maher y Thompson, 1999; Peters y Thompson, 1998; Peters et al., 2002; Tauxe, 2010; Moskowitz; Liu Q et al., 2012; Maxbauer et al., 2016).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 3:
Metodología

Tabla 3.- (continuación)

Cocientes entre parámetros magnéticos	Definición/Obtención/Instrumentación	Contribución/Influencia
<i>Susceptibilidad dependiente de frecuencias</i> ($\chi_{(f)}$)	Diferencia entre la susceptibilidad magnética en altas y bajas frecuencias que se normaliza por la susceptibilidad en bajas frecuencias. Se multiplica por 100 para expresarlo de forma porcentual. <i>Instrumentación:</i> Susceptibilímetro Bartington MS2, Sensor dual MS2B.	<i>Domínios magnéticos</i> MD (SP+MD) SP-SP/SD
<i>Susceptibilidad Anhistérica</i> (χ_{ARM})	Es el cociente entre una magnetización remanente artificial (ARM = 1000 Oe) en campo directo y un campo sobre impuesto de p.ej., 50 Oe. <i>Instrumentación:</i> P.A.R.M. Molspin Limited, Desmagnetizador Molspin-Schonstedt GSD-1, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	<i>Concentración/Domínios magnéticos</i> Ferrimagnéticos Antiferrimagnéticos MD SD-SD/SSD
SIRM _{IT} / χ	Es el producto del cociente entre la magnetización remanente artificial de saturación (producto de un pulso electromagnético <i>alto</i> aplicado en campo directo, p.ej., IT) y la susceptibilidad magnética en bajas frecuencias (0.47 kHz, p.ej.), expresada en masa. <i>Instrumentación:</i> Susceptibilímetro Bartington MS2, Sensor dual MS2B, Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Fluxgate.	<i>Concentración/Domínios</i> Paramagnéticos (Ferri/Anti/Para)magnéticos MD ó SP MD ~ (SP+SD) SD
ARM/IRM ₁₀₀	Es el cociente de las magnetizaciones remanentes artificiales entre la anhistérica (ARM p.ej., 1000 Oe) y la isothermal (IRM p.ej., 100 mT) en campo directo. <i>Instrumentación:</i> P.A.R.M. Molspin Limited, Desmagnetizador Molspin-Schonstedt GSD-1, Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	<i>Domínios</i> SP SP/SD SD ~ SD/PSD SD/PSD PSD MD
χ_{ARM} /SIRM _{IT}	Es el cociente de la magnetización anhistérica remanente y un campo aplicado de 500e que es normalizado por la magnetización isothermal remanente correspondiente a un pulso electromagnético a un campo directo de IT (~SIRM _{IT}). <i>Instrumentación:</i> P.A.R.M. Molspin Limited, Desmagnetizador Molspin-Schonstedt GSD-1, Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Fluxgate.	<i>Domínios</i> MD SD
<i>Magnetización Isothermal remanente de "campos altos"</i> (HIRM)	Es el promedio de la diferencia entre la aplicación de un pulso electromagnético a un campo inverso específico (p.e. H=100 mT, HIRM ₁₀₀ ó H=300 mT, HIRM ₃₀₀ , respectivamente). <i>Instrumentación:</i> Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	<i>Dureza, composición</i> Baja coercitividad, P.ej., Mgr Coercitividad media P.ej., Mgh Alta coercitividad, P.ej., Hmf/Glh
<i>Factor L</i>	Cociente entre la magnetización isothermal remanente en campos directos "altos" (HIRM). <i>Instrumentación:</i> Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	<i>Dureza, composición,</i> Baja coercitividad, P.ej., Mgr Alta coercitividad, P.ej., Hmf/Glh
<i>Cociente S</i>	Producto del cociente entre las remanencias de las magnetizaciones artificiales producto resultado de la aplicación de un pulso electromagnético a un campo inverso específico p.ej., S ₁₀₀ (H=100mT), y S ₃₀₀ (H=300mT), que es normalizado por un pulso de mayor intensidad en campo directo (~ saturación, IT). <i>Instrumentación:</i> Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	<i>Dureza, composición, dominio</i> Coercitividad baja, P.ej., Mgr Coercitividad media P.ej., Mgh Coercitividad alta, P.ej., Hmf/Glh MD SD ó PSD

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 3:
Metodología

Tabla 3.- (Continuación) Obtenición/ Contribución

Diagramas y comparativas entre parámetros magnéticos	Obtenición/ Contribución	Contribución/Influencia
k vs T	Las muestras se calientan a temperaturas que oscilan entre 20 y 650°C, con un gradiente que varía a razón de 7°C/min, mientras el sensor registra el $\Delta\chi/\Delta T$. Posteriormente la muestra se enfría, y se registra también $\Delta\chi/\Delta T$. <i>Instrumentación:</i> Susceptímetro Bartington (MS2), Sensor MS2W, Homo MS2WHP, Bomba de agua.	Composición
Grado de reversibilidad (GR)	<i>Instrumentación:</i> Susceptímetro Bartington (MS2), Sensor MS2W, Homo MS2WHP, Bomba de agua.	Composición/Concentración/Dureza
χ vs SIRM _T	Se mide la susceptibilidad magnética a bajas frecuencias de una muestra y se compara contra el pulso electromagnético producido de la aplicación de un campo directo alto (~ saturación=IT). <i>Instrumentación:</i> Susceptímetro Bartington MS2, Sensor dual MS2B, Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	Composición/Concentración/Dureza
χ vs SIRM _{IT} /HIRM ₆₀₀	Se compara el registro de susceptibilidad contra el cociente de la magnetización (IRM=1000mT--saturación) entre la magnetización de saturación a <i>campo alto</i> ~ 300mT. <i>Instrumentación:</i> Susceptímetro Bartington MS2, Sensor dual MS2B, Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	Composición/Concentración/Dureza Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos Paramagnéticos
SIRM _{IT} vs H _{cr}	El cociente entre el valor del pulso magnético en campo directo a IT y la susceptibilidad magnética en bajas frecuencias, que se comparan contra la coercitividad remanente (campo inverso necesario para que la magnetización de una muestra sea cero). <i>Instrumentación:</i> Susceptímetro Bartington MS2, Sensor dual MS2B, Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	Concentración/Dominio/Dureza Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos Paramagnéticos MD 6 SP MDS ~ (SP,SD) SD
HIRM ₆₀₀ vs S ₉₀₀	Se obtiene el promedio de la diferencia entre la IRM a IT en campo directo y el campo alto (300mT), y se compara contra el pulso electromagnético producido por un campo inverso de 300mT. <i>Instrumentación:</i> Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	Concentración/Dominio/Dureza Antiferromagnéticos Alta coercitividad ~ P.ej., Hm/Gh
S ₁₀₀ vs S ₃₀₀	Comparación entre los pulsos electromagnéticos a campos inversos de 100 y 300mT normalizados con uno de mayor intensidad ~ IT en campo directo (saturación). <i>Instrumentación:</i> Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	Baja coercitividad ~ P.ej., Mg Alta coercitividad ~ P.ej., Hm/Gh MD SD 6 PSD
H _{cr} /H _c vs M _{rs} /M _s	En muestras de ~1g de suelo se obtienen las coercitvidades y remanencias a partir de los ciclos de histéresis. Se comparan los cocientes de éstos por medio de este diagrama (Day). <i>Instrumentación:</i> Magnetómetro Vibrating Sample Magnetometer (VSM-ano Molspin), Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	SD, PSD, MD, SP Dominio
χ_{ARM} vs SIRM _{IT} χ	Interacción entre el ARM a 10000e normalizado por un campo de 500e y el cociente del pulso de IT en campo directo (~ SIRM _{IT}) entre la susceptibilidad magnética en bajas frecuencias. <i>Instrumentación:</i> Susceptímetro Bartington MS2, Sensor dual MS2B, P.A.R.M., Molspin Limited, Desmagnetizador Molspin-Schonsted GSD-1, Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	MD SD-SD/SSD SP MDS ~ (SD+SP) SD Ferrimagnéticos Antiferromagnéticos Paramagnéticos
ARM/IRM ₁₀₀ vs χ_{100}	El cociente entre las ARM a 10000e y la IRM aplicando un campo de 100mT en campo directo que se comparan contra la diferencia entre las susceptibilidades en alta y bajas frecuencias, que es normalizada por las bajas frecuencias y multiplicado por 100 para expresarse en porcentaje. <i>Instrumentación:</i> Susceptímetro Bartington MS2, Sensor dual MS2B, P.A.R.M., Molspin Limited, Desmagnetizador Molspin-Schonsted GSD-1, Magnetizador ASC Scientific modelo IM-10, Magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate.	SP SP/SD SD ~ SP/PSD SD/PSD PSD ~ (MD+SD) MD MD (MD+SP) SP-SP/SD

También se obtuvieron ciclos de histéresis en muestras de 1 g de suelo.

A partir de estas propiedades magnéticas se obtienen cocientes ($SIRM_{IT}/\chi$, $\chi_{fd\%}$, etc), diagramas (day, χ vs $SIRM_{IT}$, p.ej.,) y gráficas comparativas entre parámetros (χ vs $SIRM_{IT}$, χ vs $\chi_{fd\%}$, etc) respectivamente, que en su conjunto son de utilidad para el análisis de los perfiles magnéticos (variaciones de los parámetros magnéticos con el desarrollo pedológico) con las condiciones pedológico/ambientales del suelo (*Thompson y Oldfield, 1986; Stockhousen y Thuoveny, 1999; Dunlop, 2002; etc*). De acuerdo con reportes previos, la variabilidad en el contenido de diversos elementos (Ti, Al, Fe, etc) influye en su composición, Ti(Mg/Mgh/Hm) p.ej., y los mecanismos que modifican sus propiedades; llegando a considerarse que a mayor contenido en Ti [$Ti(Mg)_{+Ti}$], éstas son más estables, reflejándose esto en los perfiles magnéticos de los suelos (*Dilon y Blei, 2006; Pan et al., 2006; Sosa y Alvarado, 2010*).

3.3.2 Propiedades no magnéticas

El color es una propiedad del suelo que se utiliza como un registro del contenido de hierro en éste, mineralogía magnética ~ óxido e hidróxidos de hierro principalmente (*Tablas 2, 4*). Esto debido a la relación que presenta con la estructura, tamaño y morfología de los cristales que lo componen así como de la sustitución de cationes, lo que se refleja en sus propiedades magnéticas (*Schwertmann, 1991; Ovalles, 2003; Balsam et al., 2004*). De ahí que la variación en el color del suelo se vincula frecuentemente con la pedogénesis y el grado de intemperismo del suelo (*Cornell y Schwertmann, 2003; Sangode y Bloemendal, 2004; Liu et al., 2013*).

El color en las muestras del suelo se determinó de acuerdo con las tablas Munsell (*2000*), en húmedo y seco, bajo la luz natural y usando una placa de porcelana. La nomenclatura y proceso utilizados en las tablas $\alpha/\beta/\delta$ corresponden al matiz (α , hue), claridad (β , value) y pureza (δ , chroma) que se basan en el criterio establecido por Munsell (*1973*). El matiz se expresa en una escala angular con un arco de $3,6^\circ$ para cada hoja, P, mientras que la claridad y pureza se expresan en una escala lineal con una relación de 2,5:1 entre ellos.

Algunos autores han establecido que ciertos minerales de hierro~magnéticos (**Tabla 4**) pueden ser identificados por el color que muestra el suelo (*Schwertmann y Fisher, 1973; Kosmas et al., 1986; Acevedo et al., 2004*). A través de la coloración del suelo, diversos autores han establecido índices, IBW (*Buntley y Westin, 1965*), IRB (*Hurst, 1977*), IHD (*Harden, 1982*), IT, (*Torrent et al., 1980 y 1983*), que vinculan la composición del suelo con procesos pedogenéticos, permitiendo inferir, semicualitativamente, edades relativas (**Figura 3g**) con una mayor certidumbre

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 3:
Metodología

para en diversos suelos y climas con edades no mayores a 100ka (**Harden y Taylor, 1983**). En años recientes se ha incorporado con mayor frecuencia y éxito en los estudios de propiedades magnéticas en suelos (**Balsam et al., 2004; Lu Sg et al., 2008 y 2012**).

También se determinó el pH del suelo, tomando 10 g de muestra a la que se agregó agua destilada hasta tener una proporción 1:2.5, agitándose durante 30 minutos y dejándose sedimentar por 15 minutos, procediéndose entonces a tomar la lectura. Para establecer las fracciones granulométricas, ésta se llevo a cabo por medio de tamices, utilizando 50g de muestras. Se observó que hay una diferencia de $\pm 2\%$ entre los datos obtenidos con respecto a otros trabajos previos (**Cabadas, 2004 y 2007; Díaz, 2008; Rivera, 2008**) por lo que se ha considerado que no afecta en el análisis de las propiedades magnéticas al homogenizar las muestras por medio de su cuarteo.

A partir de las propiedades no-magnéticas del suelo se obtuvieron relaciones útiles para la interpretación integral de los resultados magnéticos, como son los el índice de Feo/Fed que permite evaluar tanto el grado de intemperismo de los minerales primarios, como las condiciones ambientales de sitio que lo generaron (**Shoji y Dahlgren, 1993**). La relación limo-arcilla (L/A) que se basa en considerar que la fracción de limo del suelo está compuesta principalmente de minerales intemperizables, mientras que la fracción de arcilla representa el material secundario derivado del intemperismo del limo (**Young, 1976; Van Wambeke, 1992**).

Por otro lado, las edades de los suelos que se reportan en este documento son tomadas de trabajos previos (**Solleiro et al., 2003; Cabadas, 2004 y 2007; Díaz, 2008**; entre otros), y se han calibrado utilizando el programa CALPAL (Cologne Radiocarbon Calibration & Paleoclimate Research Package), del laboratorio de Radiocarbono del Institut für Ur- und Frühgeschichte, Universität zu Köln (<http://www.calpal-online.de/>).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 3:
Metodología

Tabla 4.- Color del suelo como indicador de la presencia de minerales magnéticos

Mineral	Composición	Color
Magnetita (Mg)	Fe_3O_4	
Maghemita (Mgh)	Fe_2O_3	2,5YR, 2,5YR3/4, 5YR
Hematita (Hm)	Fe_2O_3	2,5YR, 5R, 5R 3/6, 5YR, <7,5YR, 8R, 10R 10YR4/8, 10YR4/6
Goethita (Gth)	$\alpha FeOOH$	2,5Y, 2,5YR, 7,5YR, 7,5YR5/6 10YR, 10YR3/3 10YR5/6, 10YR 7/7, 10YR8/5, 10YR8/6
Lepidocrocita (Lpc)	$\gamma FeOOH$	2,5YR4/6, 5YR 5YR3/8, 5YR6/8 7,5YR, 10YR >6 VALUE
Ferridrita (Ferr)	$Fe^3SO_3(OH)_9$	2,5YR, 2,5YR3/6 5YR, 5YR4/4 5YR5/8, 7,5YR <6VALUE
Gregita (Greg)	Fe_3S_4	
Pirita (Pyr)	FeS_2	10YR2/1
Glauconita (Gla)	$(K,Na)(Fe^{3+},Al,Mg)_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$	5Y5/1
Jarosita (Jar)	$KFe_3^{3+}(SO_4)_2(OH)_6$	5Y6/4 5Y6/3 5Y6/4>=6
Akaganita (Akg)	$(Fe^{3+},Ni^{2+})_8(OH,O)_{16}Cl_{1,25} \cdot nH_2O$	7.5YR6/6

La tabla contiene una relación de algunos minerales de hierro del suelo con el color. De izquierda a derecha se presenta: El nombre y nomenclatura utilizada para denotar al mineral magnético, su fórmula química, rango de colores establecidos a partir de las escalas de munsell. Los datos corresponden a diversos reportes previos (Schwertmann y Fisher, 1973; Kosmas et al., 1986; Torrent et al., 1987; Schwertmann, 1993; NRCS-USDA, 2012).

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

AREA DE ESTUDIO

“No hay motivo de competitividad alguna entre la razón y la Fe: Una está dentro de la otra, y cada una tiene su propio espacio de realización”

*DIDES ET RATIO
(Juan Pablo II)*

Capítulo 4

4 Área de estudio

Durante esta investigación se analizaron catorce perfiles de suelos volcánicos que se desarrollan bajo diferentes regímenes de precipitación y temperatura (**Figuras 2 y 3**) dentro de la Faja Volcánica Transmexicana, FVTM (**Figura 2**), mismos que están distribuidos en tres regiones: 1) Valle de Teotihuacán (VT), 2) Glacis de Buenavista (GB), y 3) volcán Nevado de Toluca (VNT).

La clasificación de los suelos se estableció considerando solo la unidad pedogenética fundamental reportada en trabajos previos (*Cabadas, 2004 y 2007; Díaz, 2008; Rivera, 2008, etc.*) que consideran los criterios de la *World Reference Base (WRB 2015)*. De esta forma, los suelos analizados en este estudio comprenden etapas evolutivas: a) incipientes (Fluvisol, Regosol), b) moderadas (Cambisol, Andosol, Vertisol), y c) avanzadas (Calcisol, Luvisol), respectivamente.

4.1 Faja Volcánica Transmexicana

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) con una extensión aproximada de 1000 km de longitud y una superficie de 20 x 150 km², es una provincia fisiográfica de compleja interacción entre las placas tectónicas de Cocos y Norteamérica. Se ubica entre los 21° 38' 24" - 18° 23' 24" N y 96° 22' 12" - 105° 45" W, en donde se localizan los principales volcanes del país (**Figura 2**), mismos que atraviesan al país de Este a Oeste (*Macías et al., 1997; Macías, 2007*). Autores como *Ortega (1992)* y *Gómez y colaboradores (2005)* asocian su origen con la subducción de las placas, que dieron origen a un arco magmático continental andesítico formando estratovolcanes calco-alcalinos con una orientación E-W en la parte central del país, y al WNW-ESE en la parte occidental que formó un ángulo de 16° (*Macías et al., 1997; Macías, 2005; Siebe et al., 2005*).

Diversos autores han establecido que ésta se puede subdividir en tres grandes provincias (regiones occidental, central y oriental) de acuerdo al tipo de interacción tectónica, volcánica y petrológica (*García, 2000; Mireggi et al., 2008*).

La región occidental, originada por el punto triple Colima-Chapala-Tepic, es de una composición predominantemente alcalino y calco-alcalino debido a la actividad volcánica. La porción central se caracteriza por un vulcanismo monogenético calco-alcalino con algunos estratovolcanes andesítico/dacíticos así como calderas con productos sílicos (*García et al., 2000*), mientras que en la región oriental, los autores establecen que los estratovolcanes son de tipo andesítico/dacíticos. Ferrari y colaboradores (*1999*) sugieren que la actividad volcánica dentro de la

región ocurrió en pulsos de diferente intensidad y en distintos periodos de tiempo que dieron origen a la formación de la sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana.

El vulcanismo dentro de la Faja se ha caracterizado por pulsos de mayor intensidad, separados por periodos de actividad reducida, sobresaliendo tres etapas principales: a) el periodo entre 11-7 Ma, dominado por material máfico, volumétricamente significativo y de composición alcalina (*Ferrari et al., 1999*), b) entre 8-5 Ma, asociado con un vulcanismo evolucionado a lo largo del cinturón, con emplazamiento de grandes volúmenes de riolita e ignimbritas (*Klitgord y Mammerick, 1982*), y c) 5 Ma al presente, que se asocia con un nuevo episodio de vulcanismo de máfico a intermedio de composición alcalina (*Gilbert et al., 1985; Righler et al., 1995; Ferrari et al., 1999*). Otros autores han establecido la transición del Plioceno al Cuaternario como la etapa en la que se han emplazado principalmente conos de ceniza basáltica y volcanes escudo en su mayoría frente al arco, así como estratovolcanes andesítico/basálticos en la parte posterior (*Nelson, 1980; Lange y Carmichael, 1991; Righler y Carmichael, 1992; Righler et al., 1995*).

La diversidad de productos eyectados por la actividad volcánica de la zona, favorece que se desarrolle una amplia gama de suelos cuya formación es controlada por las condiciones de su entorno durante los periodos de inactividad volcánica ó estabilidad del paisaje (*Jasso et al., 2002*). De ahí que el suelo de origen volcánico constituya una valiosa y potencial fuente de información complementaria para diversas investigaciones pedológicas, vulcanológicas y climático-ambientales, entre otras.

La actividad volcánica, la diversidad de rocas, así como los diferentes regímenes de precipitación y temperatura son algunos de los factores que hacen de la FVTM una de las fuentes de material parental más importante del país para la formación de una diversidad de suelos. Esto es de gran importancia ya que el estudio de estos suelos permitirá alcanzar una mejor comprensión de su dinámica evolutiva, los mecanismos responsables de las transformaciones que ocurren en el suelo, su pedogénesis, mineralogía magnética y su relación con el ambiente.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio

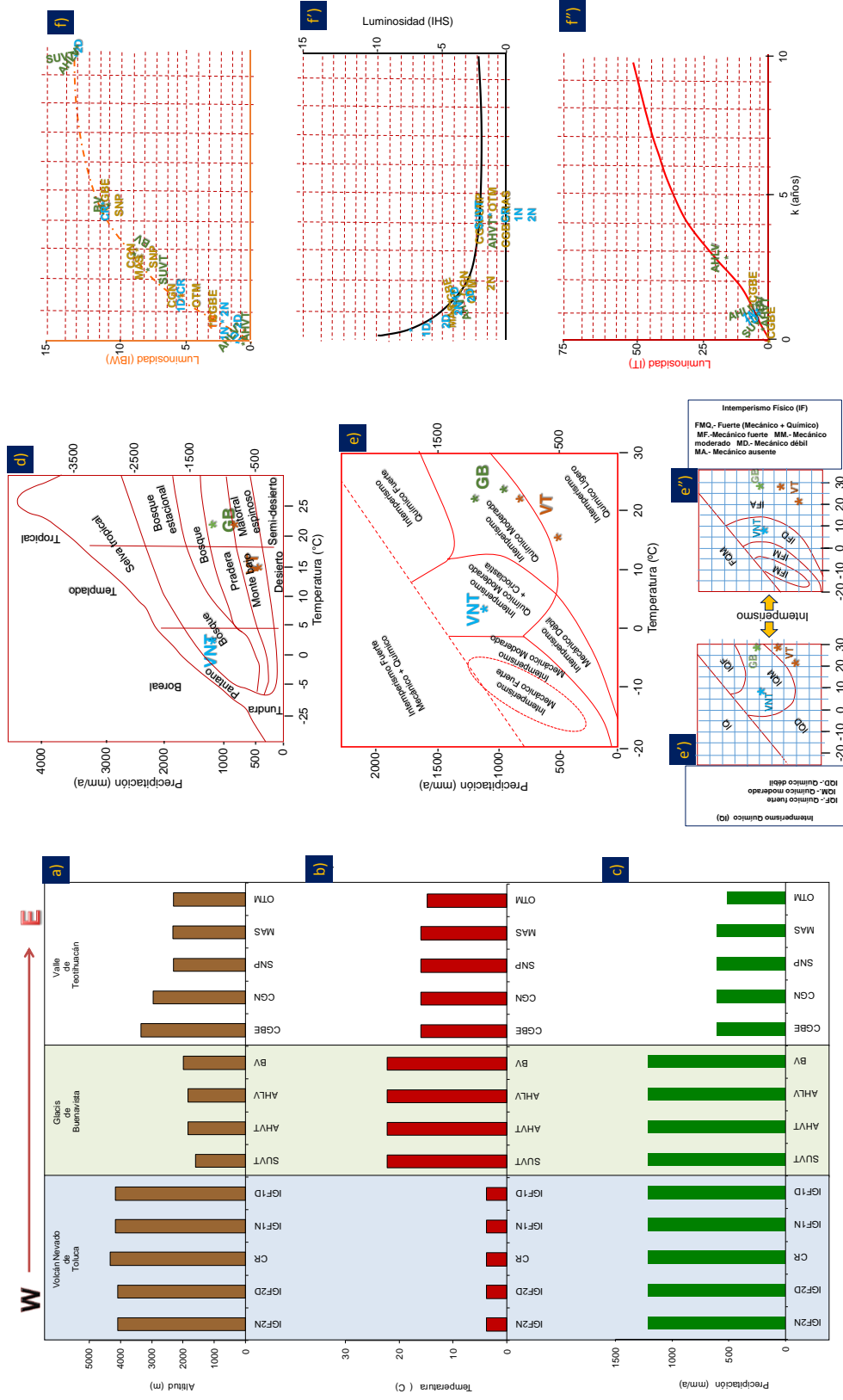


Figura 3.- Características ambientales de los suelos analizados. La figura muestra la representación esquemática de los perfiles y algunos de sus aspectos ambientales analizados en este documento. Contiene: La altitud en la que se ubican los perfiles (a), los valores medios anuales de temperatura (b) y precipitación (c), valores promedio de χ promedio (d), relación precipitación/temperatura con la cubierta (e) y con el intemperismo (f, f', f''). Los datos se tomaron de los registros de CONAGUA; INEGI, 1999; y García 2004, Huggett, (2007); Pellic (1950); Birkelad, (1999). Valle de Teotihuacán (VT), Glacis de Buenavista (GB), Volcán Nevado de Toluca (VNT).

4.2 Región 1: Valle de Teotihuacán

Se localiza dentro de la cuenca de México, al noreste de la ciudad de México (19° 38' - 19° 45' N y 98° 40' - 98° 54' W, entre los 2,250-3,340 m snm) tiene una extensión aproximada de 342 km² (**Figura 4**). Mooser (**1975**) estableció que su formación es producto del vulcanismo ocurrido en la cuenca, el cual comprende siete fases eruptivas: a) las primeras dos en el Oligoceno, b) dos más durante el Mioceno, una quinta en el Plioceno y las dos últimas en el Cuaternario superior. Las evidencias del vulcanismo en la zona están representadas por volcanes menores, llanos extensos, así como un drenaje poco definido. La actividad volcánica más intensa ocurre durante el Cuaternario, y se asocia con los conos de escoria, volcanes escudo, domos y flujos de lava de composición basáltico-andesítico del complejo Apan-Tezontepec (**García et al., 2002**).

Las rocas volcánicas más antiguas en la región son de tipo andesitas y dacitas del Plioceno temprano y basaltos del Plioceno tardío, visibles en el cerro Patlachique y el cerro Gordo (**Vázquez y Jaimes, 1989; García et al., 2002**).

Las planicies aluviales son las zonas donde se observa un efecto de acción abrasiva dentro de la región, mientras que las zonas de procesos acumulativos se localizan en áreas con pendientes ligeras. El relieve es producto de la interacción ocurrida entre la actividad volcánica y su erosión, dando origen a la formación de valles y a la acumulación de sedimentos en depresiones. Los derrames de lava y los depósitos piroclásticos son también dos de los factores que regulan el relieve del valle y determinan las pendientes del terreno.

La orografía afecta la distribución de la humedad y por consiguiente la distribución y cantidad de precipitación, lo que da lugar a climas que varían de semi-secos a sub-húmedos (**García, 1968, 2004, CONAGUA**). El promedio de datos de estaciones meteorológicas cercanas a las localidades de este estudio reportan rangos de 514.3-850 mm de precipitación y 14.8 y 22.3 °C de temperatura (**Figura 5, Tabla 5**). Actualmente en la región las principales comunidades vegetales están representadas por una cubierta vegetal que incluye matorrales xerófilo y de encino (*Quercus microphylla*), pastizal, bosque de encinos (*Quercus* spp.), vegetación acuática y vegetación antropogénica (**Cabadas, 2004**).

La cubierta pedológica de la región comprende suelos de tipo Feozem (48%), Vertisoles (16%), Cambisoles (13%), y Leptosoles (13.5%), (**INEGI, 1999 E14B21-E; Gama et al., 2004**).

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio (VT)

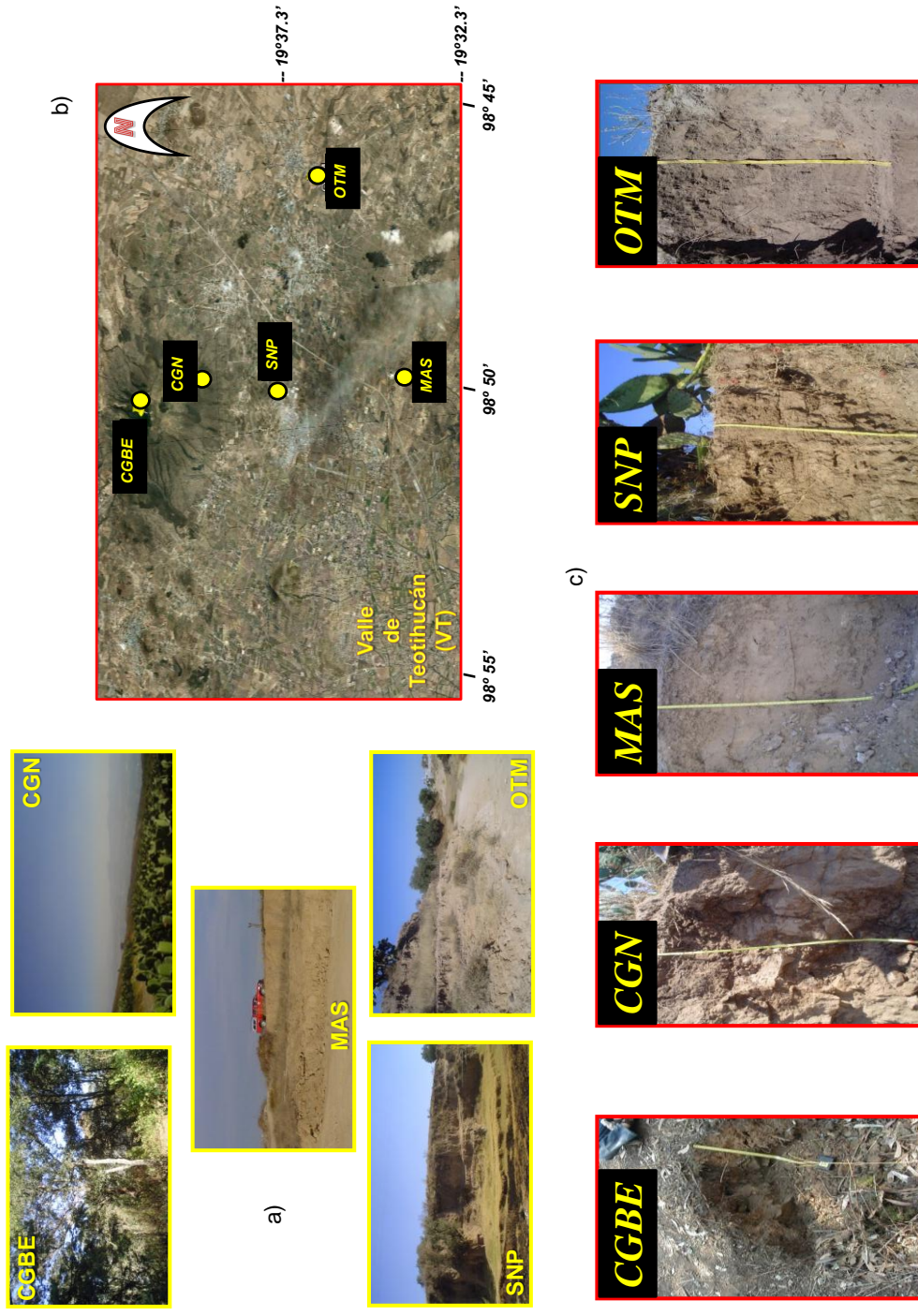


Figura 4- Localización de los perfiles estudiados en la región (1), valle de Teotihuacán (VT). La figura contiene: las fotos del entorno en el que se desarrollan los suelos (a), la fotografía de satélite con la ubicación de los perfiles (b), así como de estos (c). En su unidad pedológica fundamental, se ha considerado y clasificado a los perfiles como Cambisoles (CGBE y CGN), Calcisol (MAS), y Fluvisoles (SNP y OTM) respectivamente. Los suelos, su clasificación y propiedades no magnéticas han sido estudiados y establecidos en reportes previos (Pej., Cabadas, 2004; McClung de Tapia et al., 2005; Rivera et al., 2008; Solleiro et al., 2011).

Gama y colaboradores (2000) establecen que los suelos de la región se caracterizan por la superposición de diversos horizontes diagnósticos, así como por capas de aluvión volcanogénico; lo que les imprime a los suelos un carácter *policíclico*, concepto definido por *Smolikova, (1967)* con diferentes edades y diversos grados de evolución.

En la región se estudiaron 5 perfiles de suelo que se encuentran distribuidos en tres principales localidades: a) cerro Gordo (CGBE y CGN) ambos Cambisoles, b) San Martín de las Pirámides (MAS), Calcisol y San Pablo (SNP) y c) Otumba (OTM), siendo los dos últimos Fluvisoles (**Figura 4 y 6**). Estos perfiles también han sido analizados anteriormente con estudios muy completos a través de diferentes técnicas, desde diversas perspectivas pedológicas y de reconstrucción climática (*Cabadas, 2004 y 2007; Gama et al., 2005a y b; Solleiro et al., 2006 y 2010; Salcido, 2012*), ambientales (*León, 2010; Barceinas, 2015*), geoquímicos (*Lounejeva et al., 2007*), y arqueológicos (*McClung et al., 2003 y 2005; Rivera et al., 2007, Rivera 2008; Solís et al., 2012*). En ellos se reportan que los suelos son dominados, en general, por la presencia de plagioclasas cálcicas (50%), anfíboles y piroxenos (20%), y el resto (vidrio volcánico, micas, cuarzo y minerales opacos) con una distribución heterogénea, en la fracción de arena fina a muy fina (*Cabadas, 2004 y 2007; Rivera, 2008*). También han establecido la existencia y dominancia de haloisita deshidratada, con un contenido uniforme en equilibrio de haloisita 7A y cristobalita en las fracciones de arcilla (*Cabadas, 2004 y 2007*), así como un registro del pH que fluctúa entre 6 y 8.28, mientras que el contenido de carbón orgánico oscila entre 0.43 y 1.44 (*Cabadas, 2007; Rivera et al., 2007; Rivas et al., 2012*).

A continuación, se presenta brevemente las descripciones de los perfiles que se han estudiado para esta región. El criterio utilizado para presentar los perfiles no está relacionado con el grado de evolución del suelo, sino con la posición que ocupan dentro de la toposecuencia estudiada en esta área (**Figura 6**).

4.2.1 Perfil CGBE (cerro Gordo, cima)

Ubicado en la cima del cerro Gordo (19° 45' 15.4 "N, 98° 49' 26.4" W, y 3,340 m snm) en una posición estable, con buen drenaje (**Figura 6, Tabla 5**), presenta un espesor del suelo de 0.30 m y se desarrolla dentro de un relicto de bosque de encino. La secuencia de horizontes es: Ah₁-Ah₂-Bw y es clasificado como un Cambisol. La relación limo/arcilla (L/A) fluctúa entre 0.89 y 1.2, el pH es de 6.

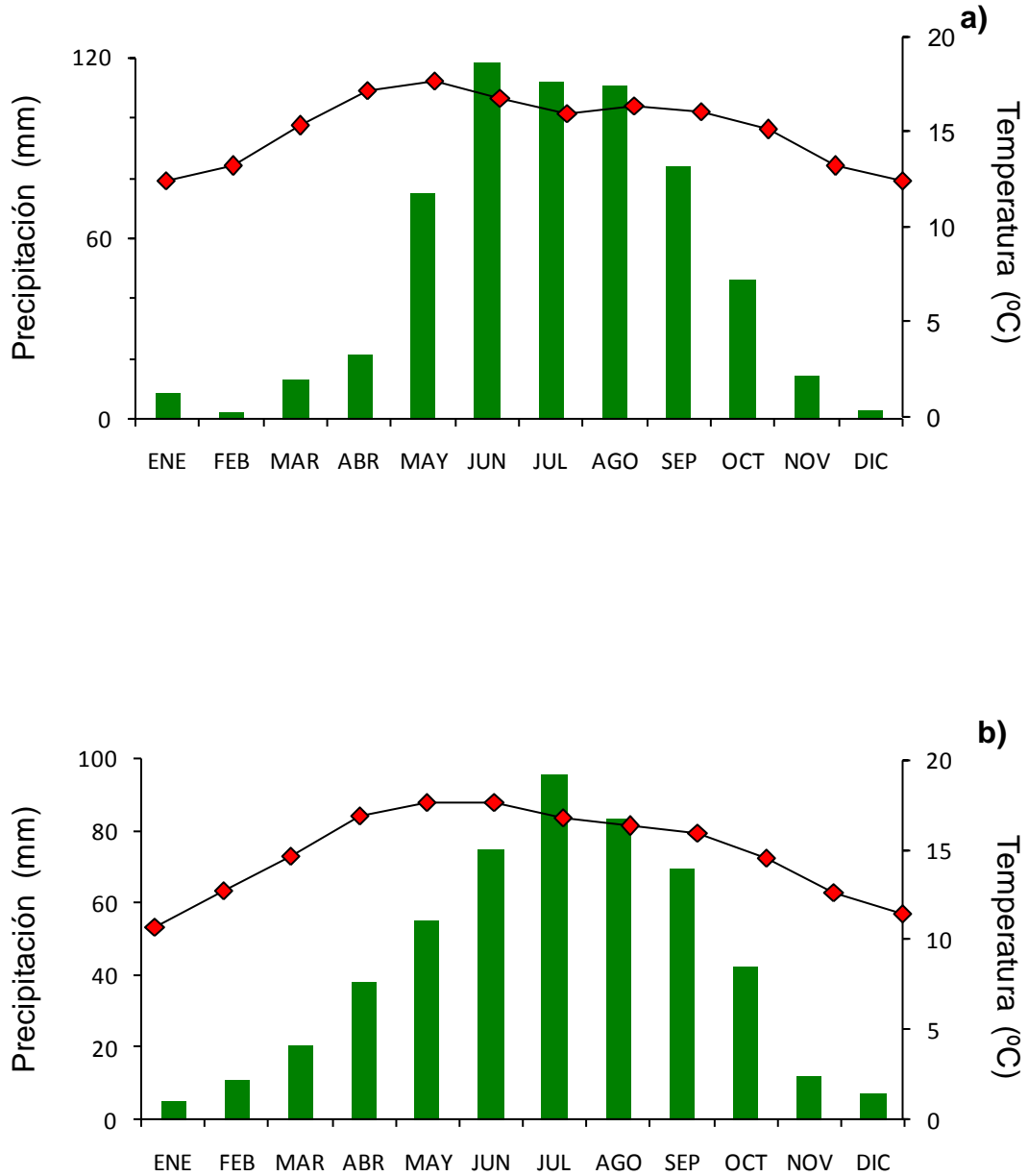


Figura 5.-Registro de la precipitación y temperatura en las localidades de la región 1, valle de Teotihuacán (VT). La figura muestra los valores medios mensuales de precipitación (barras, escala de la izquierda) y temperatura (rombos, escala de la derecha) que se han tomado de trabajos previos así como de los reportes de estaciones meteorológicas de *CONAGUA*. En la parte superior (a) corresponde a datos de una estación ubicada en la localidad de San Martín de las pirámides (E-00015097) y en la parte inferior (b) a una localizada en Otumba (E-00015065), respectivamente.

El horizonte Ah tiene un color pardo oscuro, evidenciando un contenido elevado de materia orgánica (M.O.), posee una densidad de raíces de media a alta, y una textura limosa. El límite entre los subhorizontes es irregular, difuso, con una transición gradual y una estructura granular. El horizonte Bw muestra una coloración pardo-amarilla, con una densidad de raíces menor que en Ah, además de tener una estructura en bloques subangulares.

4.2.2 Perfil CGN (cerro Gordo, ladera)

Se localiza sobre una ladera en el flanco sur del cerro Gordo (19° 44' 51.8" N, 98° 49' 22.3" W y 2,948 m snm) dentro de una posición inestable, donde la vegetación cambia de bosque de encino a un cultivo de *Opuntia*. El drenaje es moderado, la relación limo/arcilla es inferior a 2.31 (**Figura 6, Tabla 5**). El suelo posee un desarrollo moderado, tiene un espesor de 0.80 m, una secuencia de horizontes: Ap-Ah-AB-BC, y se ha clasificado como un Cambisol (**Cabadas, 2004; Solleiro et al., 2006**).

De acuerdo con los autores, el contenido de arcilla varía entre 15 y el 33% (**Tabla 5**) siendo el horizonte BC donde se encuentra el mayor contenido de esta fracción (**Cabadas, 2004; Solleiro et al., 2006**). Datos de Cabadas (**2007**) señalan la presencia de haloisita en el suelo, que coexiste dentro del horizonte AB y BC con caolinita, sugiriendo una pedogénesis del suelo lenta, pero intensa y con mayor humedad. Es notorio el cambio de color entre los horizontes Ap y Ah, lo que se asocia con la pérdida de materia orgánica en Ap, debido al cambio de uso de suelo (deforestación y cultivación), asociado con un predominio de plantas C4 (**Cabadas, 2004**).

El pH del perfil es neutro y el contenido de M.O. oscila entre 2.8 y 0.8%, los valores de Feo/Fed dentro de los horizontes BC y Ap, indican que en éstos existe una mayor proporción de óxidos de hierro amorfo, mientras que en los horizontes Ah y AB es mayor el contenido de hierro cristalino (**Tabla 5**).

De acuerdo con **McClung y colaboradores (2003)** el paleosuelo que subyace al suelo moderno tiene una edad de $13,340 \pm$ años, reportándose posteriormente un fechamiento de $6,054 \pm 99$ años para la base del suelo moderno, lo que sugiere que esta es la edad máxima del suelo moderno (**McClung et al., 2005**).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio (VT)

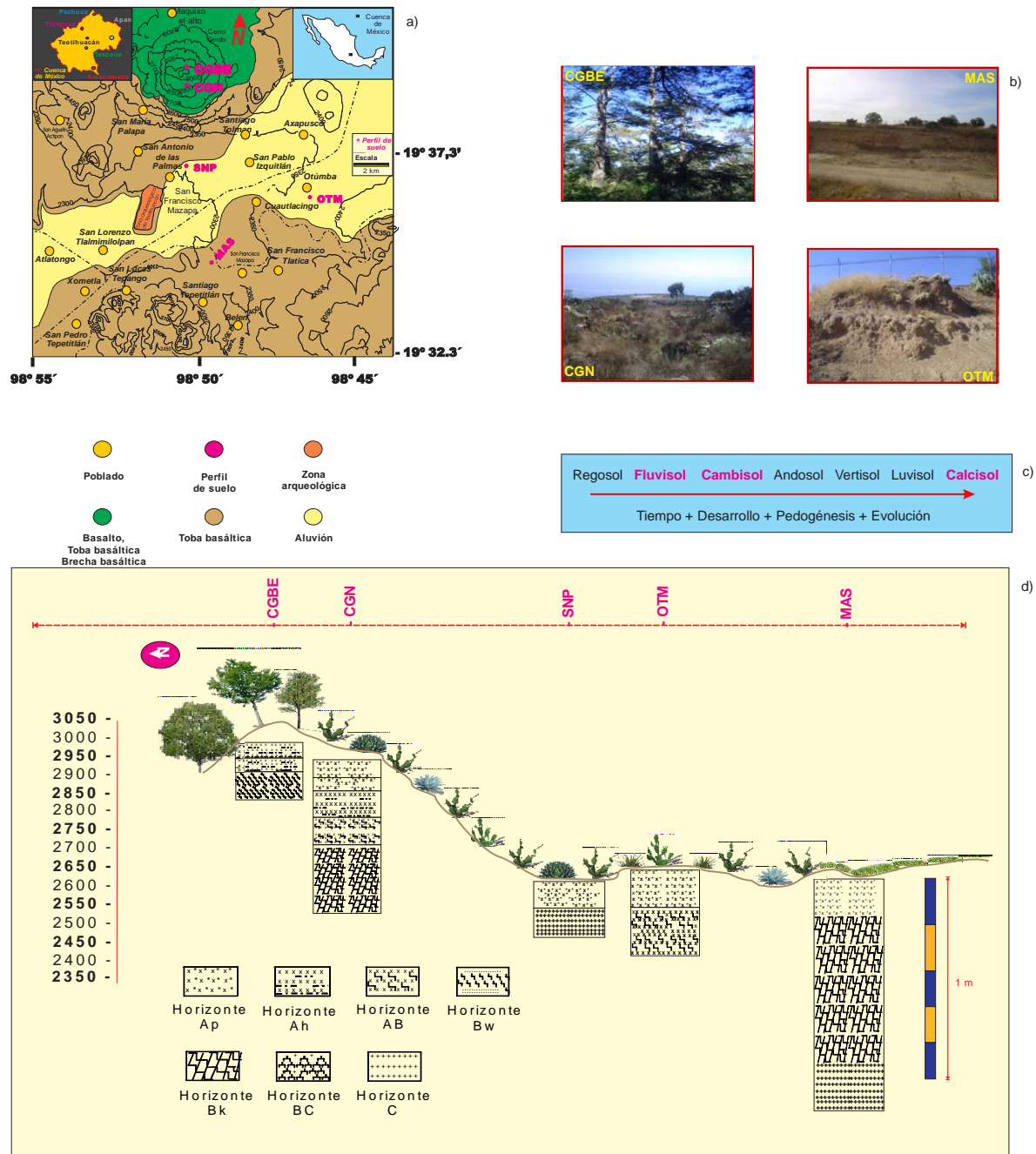


Figura 6.-Ubicación y distribución en una sección de los perfiles estudiados en el valle de Teotihuacán. La figura presenta la distribución de los suelos de esta investigación y el tipo de roca (a), las fotos del entorno de los perfiles (b), la comparación de su grado evolutivo con respecto al resto de las regiones del estudio (c), así como su distribución en una sección (d). CGBE y CGN son Cambisoles, MAS es un Calcisol, SNP y OTM son Fluvisoles respectivamente. La figura se construye con base a datos de trabajos previos (INEGI, 1999 E14B21-T,G,E).

4.2.3 Perfil MAS (San Martín de las Pirámides)

Ubicado en la parte baja de la sierra Patlachique ($19^{\circ} 39' 36.8''$ N, $98^{\circ} 49' 19.4''$ W, 2,322 m snm), en una posición estable del valle, presenta un buen drenaje. Tiene un espesor de 1.20 m, muestra una secuencia de horizontes: Ap, Bk, C, y se ha sido clasificado como un Calcisol (**Figura 6**). Su pH es alcalino, la relación L/A es inferior a 1.8 (**Tabla 5**).

El horizonte Ap es de color pardo oscuro, contiene pequeños y abundantes restos desgastados de cerámica, mostrando un uso intensivo del suelo desde la época teotihuacana (**Cabadas, 2004**).

En el horizonte Bk, el color cambia a pardo-amarillento, posee el contenido máximo de arcilla (32.74%) el cual es moderado en el resto del perfil, y que dada la menor proporción que existe en el horizonte C, indica que ésta fue formada por pedogénesis, con evidencias de procesos redox (**Cabadas, 2007**). Trabajos previos señalan la presencia de Caolinita y Haloisita dispersa en el suelo (**Cabadas 2004 y 2007**). El contenido de M.O oscila entre 1.4 y 0.7%, y se han reportado que presentan valores de Feo y Fed similares en el perfil, aunque el cociente Feo/Fed sugiere que es el horizonte Ap el que muestra menor intemperismo (**Tabla 5**). Un rasgo que caracteriza al suelo son las acumulaciones de carbonato de calcio que rellenan fisuras, poros y biporos (**Cabadas, 2004**).

El horizonte C, tiene una estructura en bloques subangulares y angulares moderadamente desarrollados, es duro, friable y adhesivo, con una abundante presencia de poros, su límite es claro y ondulado. El paleosuelo que subyace al suelo moderno en estudio ha sido fechado en $13,358 \pm 140$ años (**Cabadas, 2004**), lo que sugiere que ésta es la edad máxima del Calcisol (**Solleiro et al., 2006**).

4.2.4 Perfil SNP (Río San Pablo)

También se ubica en una posición con buen drenaje en la parte baja del valle ($19^{\circ} 42' 25.3''$ N, $98^{\circ} 49' 21.5''$ W, y 2,315 m snm), tiene un espesor de 0.30 m, y un contenido de M.O. inferior a 1.74% (**Figura 6, Tabla 5**) en el que se lleva a cabo un cultivo intenso de *Opuntia* (nopales). El perfil presenta una secuencia de horizontes: Ap-C se ha clasificado como un Fluvisol, con un desarrollo incipiente. Sin embargo, muestra una alta cantidad de arcilla (36.9%) y valores muy bajos de Feo/Fed (0.02), lo que se asocia con una mayor pedogénesis. El pH es alcalino, la relación L/A oscila entre 0.7 (C) y 1.13 (Ap), (**Tabla 5**).

De acuerdo con sus propiedades morfológicas, el suelo tiene una estructura pobremente desarrollada, es muy friable y en el horizonte C aún conserva laminaciones, lo que denota el carácter aluvial (*Rivera et al., 2007; Rivera, 2008*).

Este suelo se encuentra separado de un paleosuelo bien desarrollado, por depósitos que indican al menos dos ciclos de erosión/sedimentación/pedogénesis (*Salcido, 2012*). El paleosuelo ha sido fechado en $2,160 \pm 60$ años (*Rivera et al., 2007*). *Solleiro et al., (2011)* obtuvieron un fechamiento en un pedosedimento que está entre el Fluvisol y el paleosuelo (a partir de materia orgánica quemada), el cual arrojó una edad de 500 años, por lo que cabe suponer que el suelo SNP tiene una edad menor.

4.2.5 Perfil OTM (Otumba)

Se encuentra en la parte baja del valle, ($19^{\circ} 41' 24.5''$ N, $98^{\circ} 45' 48.1''$ W, y 2,314 m snm) en una posición geomórfica similar al de SNP, pero con una pendiente ligeramente mayor, (**Figura 6**). El suelo tiene un espesor de 0.7 m, con una secuencia de horizontes: Ap-AB, y ha sido clasificado como un Fluvisol. Ambos horizontes presentan un color grisáceo, cuyo contenido de MO oscila entre 2.3 y 2.5%, con un pH neutro (**Tabla 5**). La relación L/A no excede 1.34. De acuerdo con datos de *Cabadas (2004)* la haloisita se encuentra dispersa en el perfil. El horizonte Ap muestra una estructura pobremente desarrollada, es muy friable con abundantes raíces, así como restos de cerámica en la superficie. El límite con AB es gradual y ondulado. Este horizonte tiene una estructura en bloques subangulares, friable, pero más compacto. Un paleosuelo subyace al suelo moderno, y ha sido fechado en $3,044 \pm 93$ años (*Cabadas, 2004*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio (VT)

Tabla 5.- Valores de algunas de las propiedades y características de los suelos del valle de Teotihuacán.

Localidad	Perfil	Ubicación	PMA	TMA	V	D	E	H	C.O.	C	pH	L/A
Cerro Gordo	CGBE (Cambisol)	19° 45' 5.4" 98° 49' 6.4" 3340msn m=8°	850	12	Bosque	XXXXXX	XXXXXX	Ah ₁ Ah ₂ Bw	5.5 2.4 1.7	7.5YR3/3	6	<1.19
Cerro Gordo	CGN (Cambisol)	19° 44' 1.8" 98° 49' 2.3" 2948msn M=8.5°	750	12	Cactácea	X	XX	Ap Ah AB BC	1.6 1.6 1.0 0.5	10YR3/3	7	<1.24
San Martín de las Pirámides	MAS (Calcisol)	19° 39' 36.8" 98° 49' 19.4" 2322msn m=2.4°	604	16	Pastizal	XXX	XX	Ap Bk C	0.8 0.6 0.4	10YR3/3	8	<1.47
San Martín de las Pirámides	SNP (Fluvisol)	19° 39' 36.8" 98° 49' 19.4" 2322msn m=1°	604	16	Cactácea	XX	XX	Ap C	1.0 0.8	10YR3/3	8	<0.9528
Otumba	OTM (Fluvisol)	19° 41' 24.5" 98° 45' 48.1" 2356msn m=2.5°	514.3	14.8	Cactácea	XX	XX	Ap AB	1.3 1.5	10YR2/2	7	<1.27

La tabla contiene información no magnética sobre los suelos analizados en la región (VT). Las columnas presentan de izquierda a derecha: El nombre de la localidad de estudio, el nombre y evolución pedológica fundamental del perfil analizado, las coordenadas donde se encuentra el perfil pedológico, los valores medios anuales de los registros de precipitación (PMA) y temperatura (TMA), así como datos sobre el tipo de cubierta vegetal (V), el drenaje (D), la estabilidad (E), la secuencia de horizontes (H), el contenido de carbón orgánico (C.O.), el color del perfil (C), el potencial de hidrógeno (pH), y del cociente limo/arcilla (L/A). El color se determinó en húmedo (H) de acuerdo a las tablas Munsell (2000). El cociente L/A relaciona a los minerales susceptibles a ser intemperizados (limo) y el material secundario derivado del intemperismo (arcilla). La simbología (X) relaciona cualitativamente de condiciones óptimas y/ó buenas (XXXXXX) a las menos favorables y/ó escasas (X) respectivamente.

4.3 Región 2: Glacis de Buenavista

Es un piedemonte compuesto de un abanico volcanoclástico con un drenaje paralelo y asimétrico que posee una superficie de $\sim 331 \text{ km}^2$. Se ha originado por una sedimentación continua de material aluvial desde el Pleistoceno, con diversos períodos de erosión y etapas de coluvionamiento en el Cuaternario, así como varios procesos de gelifracción y ladera (*Ortíz, 1978; Pedraza, 1986; Martínez y López, 2005; Díaz, 2008*). Se ubica en el límites entre la Faja Volcánica Transmexicana y la Sierra Madre del Sur, a 85 km al SE de la ciudad de México, entre los $18^\circ 45' - 19^\circ 00' \text{ N}$ y los $99^\circ 25' - 99^\circ 05' \text{ W}$, entre 1,600 y 2,200 m snm (**Figura 7**). Delimitado por diversas sierras y mesetas, estructuralmente se encuentra dentro del graben Cuernavaca, y su ubicación reflejan una actividad volcánica y geomórfica activa en el área, lo que indica una inestabilidad geomorfológica/morfogenética que deriva en la diversidad de unidades ambientales biofísicas (*Martínez y López, 2005*). De acuerdo con reportes de Palacios Prieto (**1982**), Ortiz (**1977**) y Mooser (**1996**) entre las evidencias de la actividad volcánica asociado con el Glacis se encuentran materiales de composición y edades análogas a las del volcán Zempoala así como del campo Chichinautzin. Martínez y López (**2005**) identifican y describen sesenta y cinco unidades que agrupan en: laderas de montaña de origen endógeno volcánico de flujos piroclásticos, lomeríos de origen endógeno volcánico de flujos piroclásticos, piedemontes generales de origen endógeno volcánico de flujos piroclásticos, superficies cumbresales interfluviales con barrancos adyacentes de origen endógeno volcánico de flujos piroclásticos, piedemontes locales de origen exógeno acumulativo aluviales, planicies aluviales de origen exógeno acumulativo y laderas de barrancos de origen exógeno denudatorio con planicies aluviales acumulativas marginales. Estos aspectos, influyen y ejemplifican el potencial desarrollo pedológico de la región (*Gama et al., 2007; Guerrero, 2007*) y convierten al Glacis en una zona con una amplia diversidad de suelos (*Gama, 2004; Díaz et al., 2011*).

Fries (**1960**) y Ortiz (**1977**) señalan que el basamento del glacis está formado por materiales de las formaciones Zempoala (Terciario) y Cuernavaca (Pleistoceno tardío al Reciente). Los datos paleomagnéticos de Herrero y Pal (**1978**) señalan que la edad para la formación Chichinautzin es de 780, 000 años, ubicando Ortiz (**1978**) al Glacis en el Holoceno. Trabajos posteriores lo ubican en el Plioceno (*Palacios, 1982*). Martín del Pozzo (**1987**) y Siebe (**2000**) determinan que la región se somete a un vulcanismo intenso durante el Pleistoceno, asignando tres periodos principales de actividad volcánica del Chichinautzin: a) 40, 000- 25,000, b) 25,000-10,000, y c) <10,000

Estradio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio (GB)

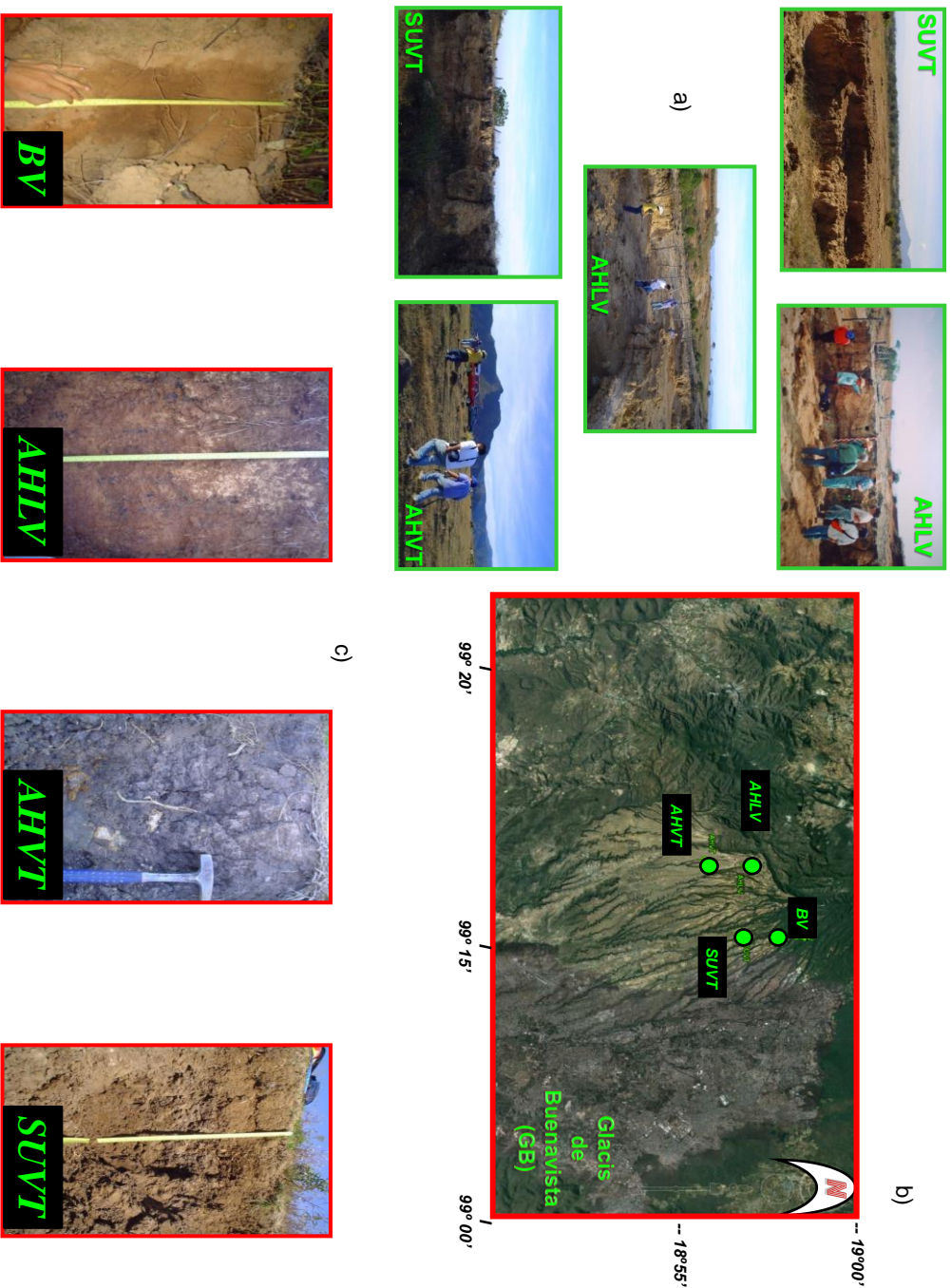


Figura 7 - Localización de los perfiles estudiados en la región (2). Glacis de Buenavista (GB). La figura contiene: las fotos del entorno en el que se desarrollan los suelos (a), la fotografía de satélite con la ubicación de los perfiles (b), así como de estos (c). En su unidad pedológica fundamental, se ha considerado y clasificado a los perfiles como Andosol (BV), Luvisol (AHLV), y Vertisoles (AHVT y SUVT) respectivamente, de acuerdo a trabajos previos (Solteiro et al., 2003; Cabadas, 2007; Díaz, 2008; Díaz et al., 2010 y 2011).

Martin del Pozzo (1989). Estimaciones recientes realizadas a partir de un análisis estadístico ejemplifican la recurrencia de actividad volcánica en este campo monogenético (Chichinautzin) y señalan que es de 5.5×10^{-3} erupciones al año, con una distribución espacial de 8.8×10^{-2} conos por km^2 , estableciendo que la probabilidad más baja es de 2.39% para un periodo de ocurrencia de erupción volcánica de la zona de cada diez años en una superficie de 5 km^2 , mientras que la tasa inferida más alta de una erupción volcánica es de 99.20% corresponde para un periodo de cien años en una superficie de 100 km^2 respectivamente (Mendoza y de la Cruz, 2010), ejemplificando así la estabilidad del paisaje de la región.

La diversidad de materiales geológicos del glacis incluyen basaltos andesíticos al norte (sierra de Zempoala), al oeste depósitos de lahar y depósitos fluviales, al este basaltos (meseta la Gloria), y al sur se reporta la presencia de calizas (Fries, 1960 y 1966; DeCserna y Fries, 1981, García et al., 2000; Siebe et al., 2004; Gama et al., 2007). Martín del Pozzo y colaboradores (1997) establecen que los depósitos volcánicos más jóvenes, cercanas al área de estudio corresponden a flujos de lava del volcán Chichinautzin con una edad $<40,000$ años A.P.

De acuerdo con Guerrero (2007) el Glacis presenta una zonación en función de las pendientes, misma que oscilan entre $15-40^\circ$ al norte, entre $3-15^\circ$ en el centro, y $<7^\circ$ en el sur. El punto más alto de la región se localiza en el norte a $2,400 \text{ m snm}$ y la más baja al sur a 900 m snm . En la actualidad, el impacto humano (deforestación, cambio de uso de suelo) producido desde épocas prehispánicas ha modificado las comunidades vegetales dramáticamente (Díaz, 2008).

En el trabajo de Martínez y López, (2005) los autores señalan una zonación de la cubierta vegetal en el Glacis, y determinan que para altitudes mayores a $2,100 \text{ m snm}$, predominan las especies *Abies*, *Quercus* y *Alnus*. La vegetación natural en las zonas altas ($>1,900 \text{ m snm}$) corresponde a bosques húmedos (Rzedowsky, 1978), bosques mixtos ($2,100-1,900 \text{ m snm}$); *Quercus magnoliifolia* y bosque de encino ($1900-1500 \text{ m snm}$). Entre $1,900-1,700 \text{ m snm}$ hay un bosque de *Juniperus* y pastizales inducidos, y entre $1,900-1,000 \text{ m snm}$ prevalece una vegetación dominada por especies *Burseraceae* y *Pseudotsingium perniciosum* (Martínez y López, 2005).

La región presenta diferentes regímenes de precipitación y temperatura, mismos que varían con la altitud. De acuerdo con Guerrero (2007) el Glacis se divide en tres climas principales: a) condiciones templado/sub-húmedo (al norte), b) semi cálido/sub-húmedo (en la región media), y c) cálido/sub-húmedo (al sur). El promedio de los datos de estaciones meteorológicas cercanas a las localidades de este estudio (INEGI, CONAGUA), señalan que en el Glacis hay una precipitación anual de $1,213.8 \text{ mm}$ y una temperatura media anual de $22.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 8, Tabla 6).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio (GB)

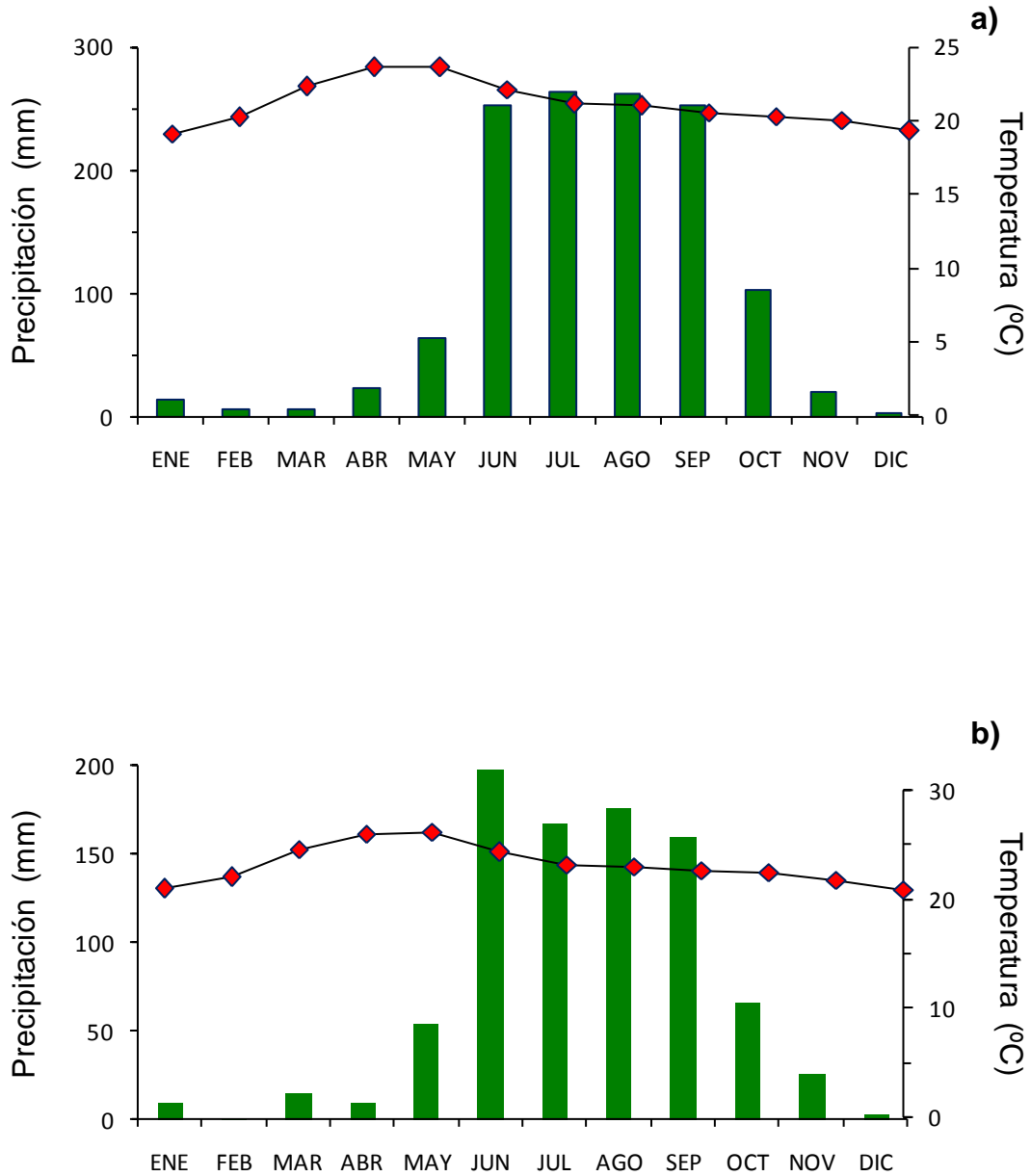


Figura 8- Registro de precipitación y temperatura en las localidades de la región 2, Glacis de Buenavista (GB). Los datos corresponden a los valores medios mensuales de precipitación (barras, escala de la izquierda) y temperatura (rombos, escala de la derecha) que se han tomado de trabajos previos así como de los reportes de estaciones meteorológicas de CONAGUA. En la parte superior (a) corresponde a datos de una estación ubicada en la localidad de Cuernavaca (E-00017004) y en la parte inferior (b) a una localizada en Temixco (E-00017014), respectivamente.

La mayor parte de los suelos modernos del glacis se caracterizan por su escaso espesor y débil desarrollo, presentando una distribución zonal (*Gama et al., 2004; Gama et al., 2007; Díaz et al. 2011; INEGI-E14A59*). A elevaciones, que oscilan entre 1,800 y 1,900 m snm, se encuentran Luvisoles que están asociados con horizontes compactados (tepetates). Entre los 1,900 y los 2,200 m snm, los suelos pueden presentar horizontes ándicos en su parte superficial, los que se han desarrollado sobre ceniza volcánica procedente de la sierra Chichinautzin. Para altitudes mayores de 2,200 m snm se ubican los Cambisoles y Andosoles que se desarrollan bajo bosques de pino.

Varios reportes previos identifican y agrupan a los suelos del glacis en tres diferentes tipos de evolución: 1) suelos tipo Luvisol, 2) suelos tipo Vertisol y 3) pedosedimentos (*Díaz, 2008; Díaz et al., 2011*). En esta región 2 (Glacis) se estudiaron 4 perfiles de suelos: a) Buenavista (BV) Andosol, b) Ahuetenco (AHLV, AHVT), Luvisol y Vertisol respectivamente y c) Santa Úrsula (SUVT) un Vertisol (**Figura 9**). Estos perfiles han sido analizados previamente en diferentes trabajos con una perspectiva pedológica ambiental (*Gama et al., 2004; 2007; Díaz et al., 2011*), en los que se han establecido las edades de los perfiles (*Solleiro et al., 2003; Díaz et al., 2010*), y en los que reportan bajos contenidos de materia orgánica (M.O.), con un alto contenido de arcillas y de hierro libre (*Escamilla et al., 2002; Solleiro et al., 2003; Díaz, 2008; Díaz et al., 2011*). Gama y colaboradores (*2007*) señalan que las pendientes muy suaves de la zona contribuyen a que los suelos muestren condiciones redox debido al estancamiento de agua. De acuerdo con los trabajos de Cabadas (*2007*), Díaz (*2008*), así como Díaz y colaboradores (*2010*) los datos por difracción de rayos X en la mineralogía de arcillas, señalan la presencia de haloisita y caolinita, así como en menor proporción esmectita, aunque esta se encuentra presente en todos los perfiles.

En general, la distribución del tamaño de partícula señala que la fracción arena oscila entre 6.97% (AHLV) y 46.66% (AHVT), la fracción limo entre 15.99% (AHLV) y 35% (SUVT) respectivamente, mientras que la fracción arcilla se encuentra entre 23.24% (AHVT) y 73.45% (AHLV). Estudios previos reportan que para la fracción de arena fina a muy fina, el mayor componente son las plagioclasas que oscilan entre el 53% (AHLV) y 70% (AHVT y SUVT) aproximadamente, seguido por el vidrio y los minerales ferromagnesianos <15% (*Cabadas, 2007; Díaz, 2008*). El perfil AHLV muestra la presencia de óxidos de hierro así como un 18% de arcillas en el suelo (*Cabadas, 2007*). En varios estudios se ha establecido de manera general que los valores de Feo y Fed fluctúan entre 0.05-1.29% y 1.55-4.48%, lo que influye en la relación Feo/Fed, mostrando valores menores a 0.3 aproximadamente (*Escamilla et al., 2002; Díaz, 2008; Díaz et al., 2010 y 2011*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio (GB)

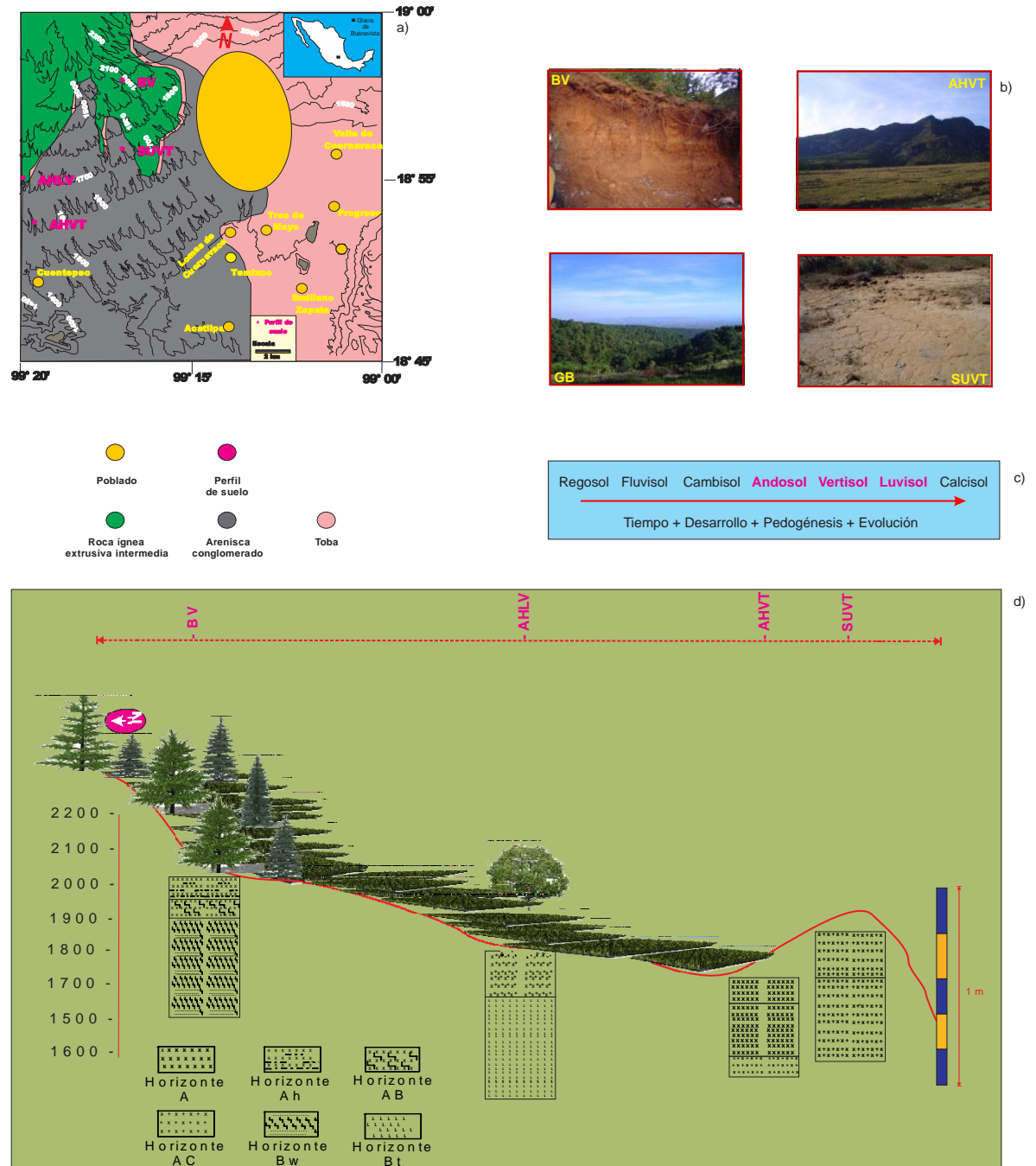


Figura 9.-Ubicación y distribución en una sección de los perfiles estudiados en el Glacis de Buenavista. La figura presenta la distribución de los suelos de esta investigación y el tipo de roca (a), las fotos del entorno de los perfiles (b), la comparación de su grado evolutivo con respecto al resto de las regiones del estudio (c), así como su distribución en una sección (d). BV es un Andosol, AHLV un Luvisol y AHVT y SUVT son Vertisoles. La figura se construye con datos de trabajos previos (INEGI, 1999 E14A59-T,G,E).

4.3.1 Perfil BV (Buenavista)

Se localiza en las afueras de la ciudad de Cuernavaca, (**Figura 9**) rumbo a la antigua carretera a Chalma, (18° 58' 0.5" N, 99° 17' 41.3" W, a 2000 m snm). Con un espesor que oscila entre 0.55-1.10 m, fue muestreado a cada 0.05 m. El perfil tiene un buen drenaje, está en una posición estable, y posee una densa cubierta vegetal (bosque de pino y encino). La secuencia de horizontes es: Ah-AB-Bw, y es clasificado como un Andosol (**WRB, 2006**). La relación limo/arcilla (L/A) es aproximadamente de 2.10 en promedio, (**Tabla 6**).

El horizonte Ah, es de color pardo/oscuro, presenta una gran cantidad de raíces, tiene un alto contenido de materia orgánica, y una estructura granular. El horizonte AB presenta un color pardo oscuro, también contiene materia orgánica, muestra un decremento en el contenido de raíces y posee una estructura con mayor desarrollo (**Tabla 6**).

El horizonte Bw es de color pardo/claro, posee una escasa presencia de raíces, no contiene materia orgánica, y tiene una estructura en bloques. *Solleiro y colaboradores (2003)* así como *Cabadas (2007)* reportan que el suelo tiene valores altos de Feo en los horizontes A, lo que indica la posible presencia de minerales de hierro de baja cristalinidad, así como un predominio de plagioclasas, piroxenos y fragmentos de roca (*Cabadas, 2007*). Díaz y colaboradores (*2010*) consideran que es un suelo con un alto grado de intemperismo.

Cabadas (2007) reporta datos que sugieren una mayor cantidad de minerales amorfos en la parte baja del perfil, así como evidencias de procesos de iluviación, la alteración de los minerales primarios y una predominancia de plantas C3. Aunque no se tiene un fechamiento para esta unidad, *Solleiro y colaboradores (2003)* reportan una edad de 12,160 A.P. para un paleosuelo que subyace al suelo aquí estudiado, lo que indica que el perfil estudiado se formó durante el Holoceno tardío.

4.3.2 Perfil AHLV (Ahuatenco, ladera superior)

El suelo se ubica cerca del poblado de Ahuetenco, 18° 56' 15" N, 99° 19' 55" W, a 1,850 m snm (**Figura 9**), su espesor es de 0.65 m, la cubierta vegetal es moderada. Se encuentra en una posición estable, con buen drenaje, su color es pardo-rojizo. Posee una secuencia de horizontes: Ah-Bt, clasificándose como un Luvisol. Su relación L/A es de 0.83 en promedio (**Tabla 6**).

El horizonte Ah posee una estructura en bloques subangulares, tiene poros dentro de los agregados con una densidad abundante de raíces finas. El horizonte Bt tiene una estructura en bloques subangulares que rompen a granulares, con una densidad de raíces medianas a finas. De acuerdo con trabajos previos, el suelo contiene agregados del horizonte que le suprayace dentro de

grietas con concreciones de óxidos de hierro (*Cabadas, 2007; Díaz, 2008*). *Díaz (2008)* señala que este suelo refleja una pedogénesis rápida para su estado evolutivo, debido a que se forma a partir de materiales previamente alterados, lo que le imprime un carácter poligenético (concepto definido por *Smilokova, 1967*) y policíclico como han sugerido previamente otros autores (*Escamilla et al., 2002; Solleiro et al., 2003*).

Datos de los índices de alteración reportados anteriormente indican que en el suelo, éstos son relativamente mayores en el horizonte Ah para mayoría de los índices estudiados (*Escamilla et al., 2002, p.ej.,*). Los autores también reportan elevadas cantidades de hierro amorfo producto de una fuerte alteración debido a la pérdida de bases y la alteración de los minerales primarios, como consecuencia de una alta tasa de oxidación-reducción. *Solleiro y colaboradores (2003)* así como *Cabadas (2007)* reportan que los valores de hierro extraído con oxalato (Feo) y ditionito (Fed) respectivamente son similares (~ 0.05%) en este suelo (**Tabla 6**). Esto sugiere un predominio de óxidos de alta cristalinidad, sobre los minerales de baja cristalinidad (*Díaz, 2008*). Aunque no se tiene un fechamiento directo para este suelo, de acuerdo a la pedostratigrafía reportada por *Cabadas (2007)* y *Díaz y colaboradores (2011)*, subyaciendo a este suelo existe un Gleysol, fechado en $12,930 \pm 50$ años, por lo que se estima que su edad (AHLV) es menor. Trabajos previos señalan que en el perfil se mezcla la dinámica de la pedogénesis en al menos dos etapas, el suelo moderno y un paleo pedo-complejo (*Escamilla et al., 2002; Cabadas, 2007; Díaz et al., 2010*).

4.3.3 Perfil AHVT (Ahuatenco, ladera inferior)

Se localiza dentro de una zona más estable del Glacis, en una planicie de pastoreo (**Figura 9**), cerca del poblado de Ahuatenco ($18^{\circ} 55' 0.46''$ N, $99^{\circ} 20' 2.6''$ W, a 1850 m snmm), presenta una vegetación secundaria de tipo pastizal inducido (*Díaz, 2008*). El suelo tiene un buen drenaje, su espesor es de 0.45 m. Tiene un color grisáceo a negro, posee una secuencia de horizontes A₁-A₂-AC, y es clasificado como un Vertisol. La relación limo/arcilla es en promedio 0.54 aproximadamente (**Tabla 6**). Los datos de reportes previos obtenidos por difracción de rayos X indican la presencia de esmectita dentro del suelo, con una sustitución de la vermiculita en el horizonte superior por caolinita en la parte baja del perfil (*Díaz, 2008*). Los horizontes tienen una transición gradual entre sí, así como un límite irregular y difuso. Se observa una alta densidad de poros, y una estructura subangular que rompe a granular. Hay evidencias de bioturbación y presencia de fracturas verticales. La relación Feo/Fed es homogénea (**Tabla 6**), y tiende a disminuir ligeramente hacia la parte baja del perfil (*Díaz, 2008*).

4.3.4 perfil SUVT (Santa Úrsula Noria)

Se ubica en la parte superior de una barranca próxima al poblado de Santa Úrsula, (18° 56' 4.7" N, 99° 45' 29" W, a 1610 m snm), su espesor de muestreo es de 0.65 m (**Figura 9**). Es de color pardo-amarillo, tiene una secuencia de horizontes: AC₁-AC₂ y es clasificado como un Vertisol (**Tabla 6**). La relación L/A es ~1.56 en promedio. Díaz (2008) considera que esta localidad es la zona límite de la distribución entre Vertisoles y Luvisoles. La vegetación del sitio corresponde con pastizal inducido, y matorrales xerófilos. Datos previos por difracción de rayos X indican la presencia de esmectita y/o vermiculita dentro del suelo (Díaz, 2008). También reporta bajos valores de sílice extraído con oxalato (Sio), así como de aluminio (Alo) relativamente más altos en la parte superficial del suelo (Díaz, 2008). El horizonte AC tiene una estructura en bloques subangulares, poco desarrollados, con abundantes raíces finas. Es friable en seco, y tiene una transición clara y abrupta. La relación Feo/Fed es homogénea (**Tabla 6**), aumentando ligeramente hacia la parte baja (Díaz, 2008). En el mismo trabajo, el autor reporta para un paleosuelo que subyace al suelo moderno, una edad de $2,194 \pm 89$ (ó 2160+-40).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio (GB)

Tabla 6.- Valores de algunas propiedades y características de los suelos estudiados en el Glacis de Buenavista

Localidad	Perfil	Ubicación	PMA	TMA	V	D	E	H	C	pH	L/A
Buenavista	BV (Andosol)	18°58'05" 99°17'41.3" 2000msnm m	1325.3	21.1	Bosque	XXXXXX	XXXXXX	Ah AB Bw	5YR2.5/2	7	0.5182 0.5108 0.5167 0.5249
Ahuatenco	AHLV (Luvisol)	18°55'0.46" 99°20'2.6" 1850msnm m	1053.6	21.9	Pastizal Inducido	XX	XXXX	Ah Bt	2.5YR3/8	7	0.2120
Ahuatenco	AHVT (Vertisol)	18°56'15" 99°19'55" 1850msnm m	1053.6	21.9	Pastizal inducido	XXXX	XXXX	A ₁ A ₂	5Y2.5/1	6	0.9129
Santa Ursula Noria	SUVT (Vertisol)	18°5'0.46" 99°20'6" 1850msnm m	967.2	23.1	Pastizal inducido	XXXX	XXXXXX	AC ₁ AC ₂	7.5YR2.5/2	6	1.56

La tabla contiene información no magnética sobre los suelos analizados en la región (GB). Las columnas presentan de izquierda a derecha: El nombre de la localidad de estudio, el nombre y evolución pedológica fundamental del perfil analizado, las coordenadas donde se encuentra el perfil pedológico, los valores medios anuales de los registros de precipitación (PMA) y temperatura (TMA), así como datos sobre el tipo de cubierta vegetal (V), el contenido de carbón orgánico (C.O.), el drenaje (D), la estabilidad (E), la secuencia de horizontes (H), el color del perfil (C), el potencial de hidrógeno (pH), y del cociente limo/arcilla (L/A). El color se determinó en húmedo (H) de acuerdo a las tablas Munsell (2000). El cociente L/A relaciona a los minerales susceptibles a ser intemperizados (limo) y el material secundario derivado del intemperismo (arcilla). La simbología (X) relaciona cualitativamente de condiciones óptimas y/ó buenas (XXXXXX) a las menos favorables y/ó escasas (X) respectivamente.

4.4 Región 3: Nevado de Toluca

El Nevado de Toluca ó *Xinantecatl* (*el hombre desnudo*, en náhuatl) como también se le conoce, es clasificado como un estratovolcán de composición andesítico-dacítico, con una altura de 4,680 m snm. Es uno de los cuatro volcanes más altos del país (*Macías et al., 1997, García, 2000; Cervantes, 2001*). Se localiza aproximadamente entre 19° 00' – 19° 15' de latitud norte y 99° 40' - 99° 50' de longitud oeste, a 22 km al SW de la ciudad de Toluca y a 60 km de la ciudad de México (**Figura 10**).

De acuerdo con el trabajo de *Cantagrel y colaboradores (1981)* su historia comenzó hace 1.5 Ma., con una emisión de lavas andesíticas que construyeron el volcán, aunque posteriormente *García y colaboradores (2001)* establecen que el vulcanismo comenzó hace 2.6 Ma con la emisión de lavas dacíticas. Una segunda etapa de actividad ocurrió hace 100,000 años con la intrusión del domo central y su destrucción explosiva (*Bloomfield y Valastro, 1977*). En los últimos 40 Ka se ha presentado al menos tres etapas de actividad Plinianas y subpliniana (*Arce et al., 2003, Cappra et al 2006; Arce et al., 2013*). De acuerdo con *Macías y colaboradores (1997)* su última etapa de actividad ocurrió hace 3,200 años (*Macías et al., 1997*)-

Varios trabajos reportan evidencias de diferentes etapas de actividad, siendo las principales: a) flujos piroclásticos no fechados, con edades estimadas >50,000 años A.P., b) flujos de pómez de color rosa (FPR), de 42,000 ± años A.P. aprox. (*Macías et al., 1997*), c) flujos de bloques y cenizas grises (FRGB), datado entre 37,000 ± y 28,000 ± años. (*Cantagrel et al., 1981; Macías et al., 1997*), d) Pómez Toluca Inferior (LTP), fechado en 24,000 ± años Ap (*Bloomfield y Valastro, 1977*), e) Pómez Toluca Superior (UTP), fechado en 10,500 ± años (*Arce et al., 2003*), f) Flujo piroclásticos fechados en 3200± años A.P. (*Macías et al., 1997*).

El clima dominante en el Nevado de Toluca es templado, subhúmedo que pasa a semicálido hacia el poniente y a semiseco al norte. A las elevaciones mayores, se presentan climas semifríos, subhúmedos. Las condiciones climáticas reportadas en dos estaciones meteorológicas (*García 1988*) indican que la temperatura media anual es de 12.7°C y la precipitación de 791.6 mm/a en la ciudad de Toluca a 2,675 m snm, y para el Nevado, a 4,140 msnm es de 4.2°C y 1,243.5 mm/a respectivamente (**Figura 11**). Diferentes estudios consideran que, hay una distribución zonal de la cubierta vegetal en el volcán y sus proximidades, que se puede dividir en general en tres tipos:

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas

Capítulo 4:
Área de Estudio (VNT)

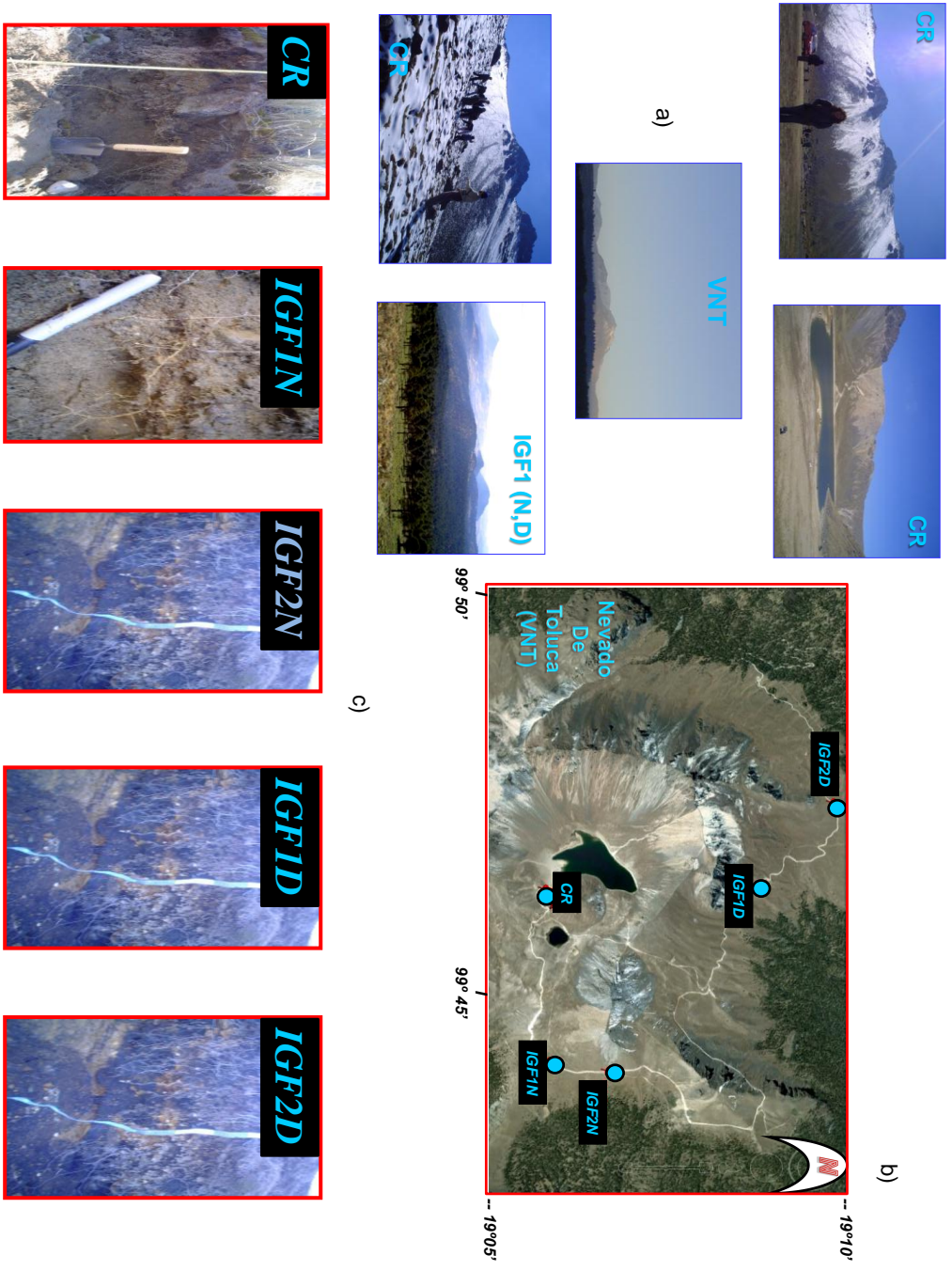


Figura 10.- Localización de los perfiles estudiados en la región 3, volcán Nevado de Toluca (VNT). La figura contiene: las fotos del entorno en el que se desarrollan los suelos (a), la fotografía de satélite con la ubicación de los perfiles (b), así como éstos (c). En su unidad pedológica fundamental, se ha considerado y clasificado a los perfiles como Regosoles, de acuerdo a trabajos previos (Jasso, 2007; p.ej.-).

a) vegetación de carácter agrícola maíz y pastizales, b) pinos y cedros, y c) pastos y zacate (Rzadowsky et al., 1978; Sandoval et al., 1987; García et al., 1988). Para altitudes mayores a 4,000 m snm establecen una vegetación en la que predominan los pastos (*Festuca toluensis*, *Festuca hepraestophila* y *Calamagrostis toluensis*). Para elevaciones entre 2,700-4,000 m snm la vegetación actual incluye pinos (*Pinus sp.*, *Pinus hartwegii*, *P. moctezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite* y *P. rudis*), oyameles (*Abies religiosa*), ailes (*Alnus sp.*), cedros (*Cupressus lindley*) y encinos (*Quercus barvinervis*). Para altitudes que oscilan entre 2,300-2,700 m snm la deforestación actual y la erosión son severas, por lo que los cultivos de temporal de maíz son la vegetación antrópica que prevalece, mientras que la escasa vegetación primaria que se preserva está representada por pastos (*Festuca*) y bosques muy alterados de encino (*Quercus barvinervis*).

Por otro lado, diversos estudios consideran también una distribución zonal de la cubierta pedológica en el Nevado, de manera que entre planicies y valles se encuentran Vertisoles, Cambisoles y Feozems, que son los suelos dominantes mientras que en áreas más jóvenes, se encuentran Histosoles y Fluvisoles (E14A47-INEGI, 1999; Sedov et al 2001; Jasso et al 2002 y 2007). Estos reportes incluso señalan que existe una distribución de los suelos en función de su altitud con respecto al mar, considerando que en la parte alta del Nevado se encuentran Leptosoles, Regosoles, Cambisoles y Andosoles ócricos.

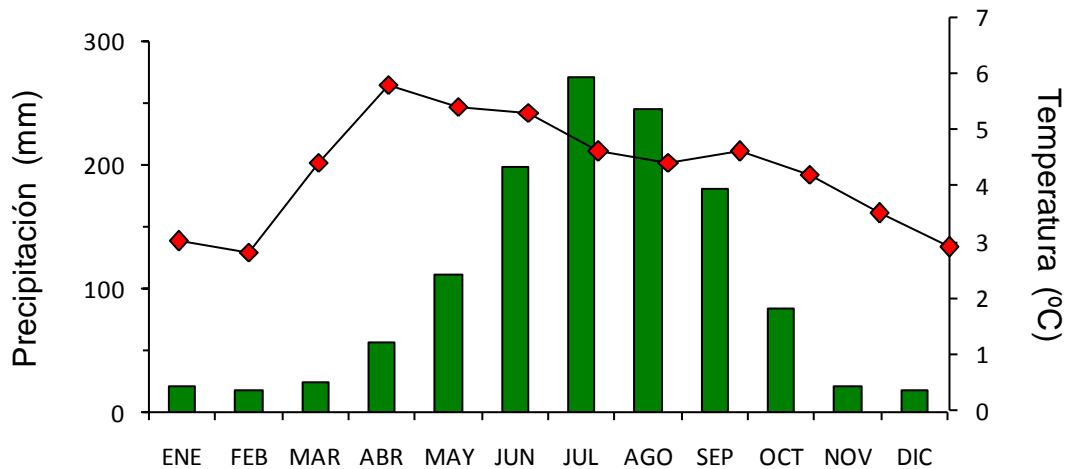


Figura 11.- Registro de precipitación y temperatura en la localidad de estudio. La figura muestra los valores medios mensuales de precipitación (barras, escala de la izquierda) y temperatura (rombos, escala de la derecha) que se han tomado de trabajos previos así como de los reportes de estaciones meteorológicas de CONAGUA. Los datos de una estación ubicada en la localidad volcán Nevado de Toluca (E-00015062).

A altitudes que oscilan entre 2,000-2,700 m snm prevalecen los Andosoles, Cambisoles y algunos Luvisoles. Entre los 2,700 a 3,700 m snm se localizan Andosoles con horizontes A húmicos, que también son asociados con Regosoles y Leptosoles téfricos y ándicos. Los suelos en la parte más alta (>3,700 m), son de tipo Regosoles téfricos, Leptosoles y algunos Criosoles. Para alturas mayores de 4,000 m, los más comunes son los Leptosoles-Regosoles.

En esta localidad, se estudiaron cinco perfiles en el cráter y la ladera norte del volcán a altitudes mayores a los 4,000 m snm. A continuación se presenta una breve descripción de los cinco perfiles de suelo. Para ello, el orden en el que se presentan los suelos es comenzando por el perfil ubicado en el cráter, y posteriormente se continúa con los perfiles que se encuentran fuera de éste (**Figura 12**).

4.4.1 Perfil CR (Nevado de Toluca, Cráter)

Este perfil se encuentra dentro del cráter del volcán ($19^{\circ} 06' 19''$ N, $99^{\circ} 45' 00''$ W a 4,126 m snm). Dentro de una posición relativamente estable en la base de la ladera sur del cráter, con un drenaje moderado y una cubierta vegetal pobre (**Figura 12**). En conjunto estas condiciones son favorables para que el suelo sea altamente susceptible de recibir e incorporar material de forma continua. Su espesor de muestreo es de 0.70 m, y aún contiene fragmentos de roca. Su pH es ácido, la relación limo/arcilla (L/A) es menor a 2.0 (**Tabla 7**). Tiene una escasa vegetación, poca densidad de raíces, su color es pardo claro, posee un límite ondulado, y una estructura masiva. Posee una secuencia de horizontes de tipo A-AC-C, y se le ha considerado como un Regosol, con un límite entre horizontes claro e irregular.

El horizonte A posee una densidad de raíces de media a alta, con una estructura esponjosa, un límite claro e irregular, una transición gradual y pocos fragmentos de roca (0.5-1%). El horizonte AC posee más fragmentos de roca, una estructura más desarrollada, un límite claro e irregular con una transición gradual. El horizonte C tiene colores más claros, una mayor densidad de fragmentos de roca, una transición gradual y un límite irregular abrupto.

4.4.2 Perfil IGF1N (Nevado de Toluca, ladera 1)

Se ubica en la ladera norte del volcán Nevado de Toluca ($19^{\circ} 07' 13''$ N, $99^{\circ} 44' 12''$ W y 4160 m snm), se encuentra próximo a la caseta de vigilancia del cráter. Es de color negro, y presenta una secuencia de horizontes es: A-AC-C, se clasificó como un suelo tipo Regosol.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio (VNT)

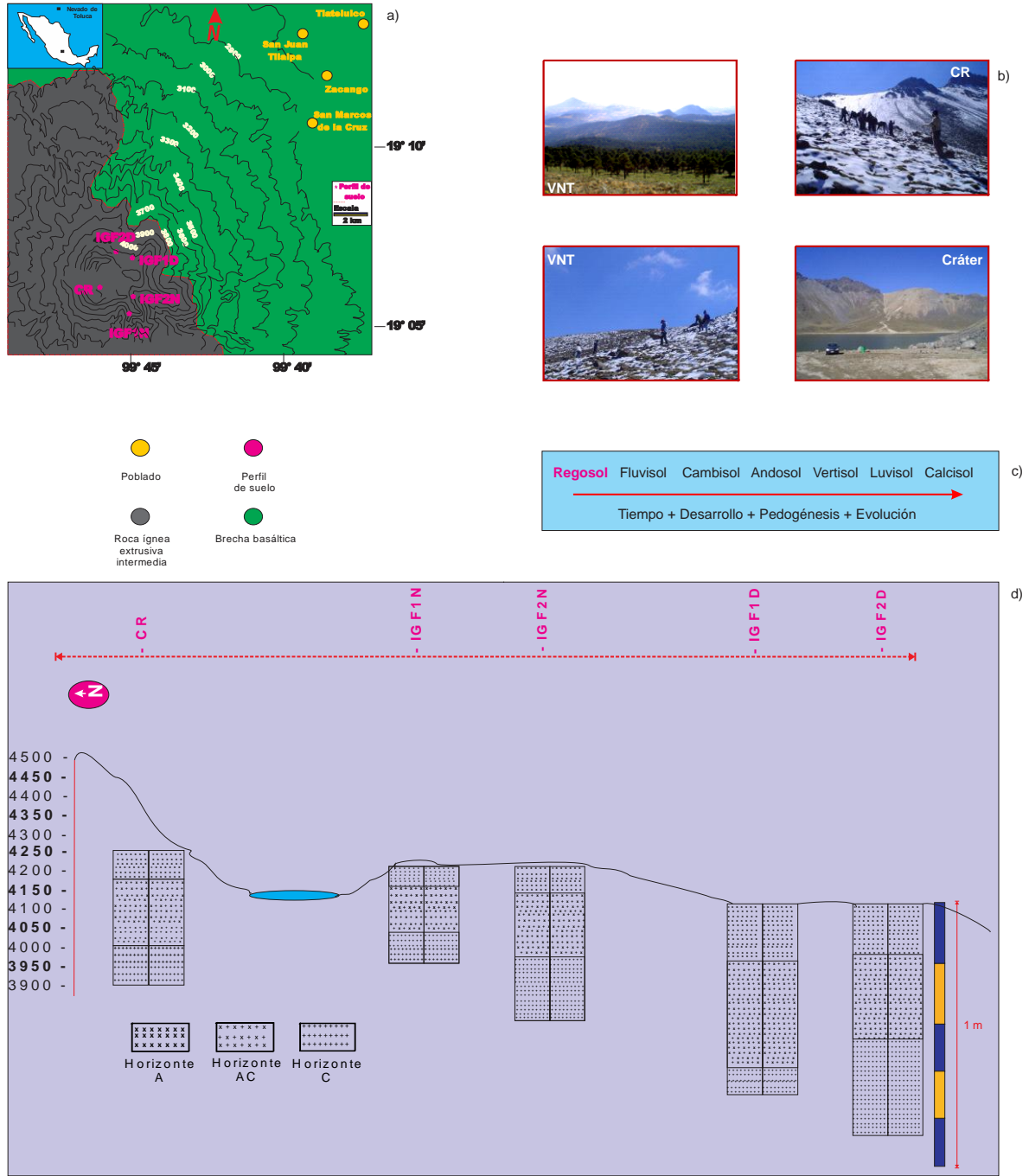


Figura 12.-Ubicación y distribución en una sección de los suelos estudiados en el volcán Nevado de Toluca. La figura presenta la distribución de los suelos de esta investigación y el tipo de roca (a), las fotos del entorno de los perfiles (b), la comparación de su grado evolutivo con respecto al resto de las regiones del estudio (c), así como su distribución en una sección (d). Los perfiles son clasificados como Regosoles. La figura se construye con datos de trabajos previos (INEGI, 1999 E14A47-T,G,E).

Su límite es irregular, con una transición entre horizontes que es gradual y difusa. Su pH es ácido, la relación limo/arcilla es menor a 1.03 (**Tabla 7**). Presenta un buen drenaje, mayor contenido de materia orgánica (*empardecimiento*) con respecto al perfil previo (CR) y una estructura poco desarrollada. Tiene un contenido de raíces moderado, y en una posición más estable que favorece el desarrollo de un mejor drenaje con respecto al perfil anterior.

El horizonte A contiene material poroso, tiene una estructura poco desarrollada, presenta una densidad de raíces medía, observándose algunos fragmentos pequeños de roca redondeados. Su límite es difuso e irregular, con una transición gradual. El horizonte AC tiene una estructura más desarrollada, presenta un límite claro e irregular, con una transición gradual. El horizonte C muestra un alto contenido de fragmentos de roca, redondeados en su mayoría.

4.4.3 Perfil IGF2N (Nevado de Toluca, ladera 2)

Se ubica en una posición relativamente estable, 19° 07' 40" N y 99° 45' 54" W a 4080 m snmm, con un buen drenaje y una cubierta vegetal moderada, (**Figura 12, Tabla 7**). Su color es negro, tiene un espesor de 0.70 m colectados a cada 0.1 m, y presenta una secuencia de horizonte de tipo: A-AC-C. Su pH es ácido, la relación L/A es menor a 1.16.

El horizonte A tiene una estructura poco desarrollada, y muestra una baja densidad de raíces. Contiene algunos fragmentos de roca angulosos, un límite claro e irregular, con una transición difusa entre horizontes. El horizonte AC presenta una estructura más desarrollada, un límite irregular y difuso así como una transición gradual. El horizonte C muestra un límite difuso, con una transición entre horizontes gradual, así como una alta cantidad de fragmentos de roca redondeados.

4.4.4 Perfil IGF1D (Nevado de Toluca, ladera 3)

Se localiza en la ladera norte del volcán Nevado de Toluca (19° 07' 13" N, 99° 44' 12" W y 4160 m snm), se encuentra próximo a la caseta de vigilancia del cráter. Tienen un espesor que oscila entre 0.50-1.00 m, su color es negro, contienen una cantidad de raíces de media a moderada (**Figura 12, Tabla 7**). Su color es pardo-oscuro a negro, y tiene una secuencia de horizontes tipo: A-AC-C, y es suelo tipo Regosol. Su límite es irregular, la transición entre horizontes es gradual y difusa. Presenta un buen drenaje, mayor contenido de materia orgánica con respecto al perfil CR.

Tiene una estructura poco desarrollada, con un contenido de raíces moderada. Se encuentra en una posición estable que favorece el desarrollo de un mejor drenaje con respecto al perfil CR. Su

pH es ácido, la relación L/A no excede 1.54, respectivamente. El horizonte A posee una densidad de raíces de media a alta, presentando algunos fragmentos de roca angulosos, y una estructura esponjosa.

4.4.5 IGF2D (Nevado de Toluca, ladera 4)

Se encuentra a 1 km de caseta que conduce al cráter del Nevado, está próximo al perfil IGF2N (**Figura 12, Tabla 7**), en una posición estable, con buen drenaje y cubierta vegetal moderada. Su color es pardo oscuro, tiene un espesor de 1.10 m y posee un pH ácido. Las muestras fueron colectadas a cada 0.1 m, presenta una secuencia de horizontes: A-AC-C, y se considera un suelo de tipo Regosol.

El horizonte A posee una densidad de raíces de media a alta, posee una estructura poco desarrollada y contiene algunos fragmentos de roca redondeados. Su límite es claro e irregular, con una transición abrupta. El horizonte AC tiene un mayor contenido de fragmentos de roca, una estructura más desarrollada y un límite claro e irregular con una transición gradual, mientras que en el horizonte C muestra una transición gradual y fragmentos redondeados de roca.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 4:
Área de Estudio (VNT)

Tabla 7.- Valores de algunas propiedades y características de los suelos del volcán Nevado de Toluca

Localidad	Perfil	Ubicación	PMA	TMA	V	D	E	H	C	pH	L/A
<i>Cráter</i>	CR (Regosol)	19° 06' 19" 99° 45' 26" 4320msm m	1213.2	3.8	Pastizal	X	X	A AC C	10YR2/2 10YR5/4 10YR3/1	5.5-6	2.091
<i>Ladera 1</i>	IGFIN (Regosol)	19° 07' 13" 99° 44' 12" 4160msm m	1213.2	3.8	Pastizal	XXX	XXX	A AC C	10YR2/1 10YR2/1 2.5Y4/2	6	1.030
<i>Ladera 2</i>	IGF2N (Regosol)	19° 07' 13" 99° 44' 12" 4160msm m	1213.2	3.8	Pastizal	XXX	XXX	A AC C	10YR4/1 10YR3/1 10YR2/1	5.5-6	1.1605
<i>Ladera 3</i>	IGF1D (Regosol)	19° 07' 40" 99° 45' 59" 4080msm m	1213.2	3.8	Pastizal	XXX	XXX	A AC C	5Y2.5/1 5Y2.5/1 10YR4/2	6	1.5440
<i>Ladera 4</i>	IGF2D (Regosol)	19° 07' 40" 99° 45' 59" 4080msm m	1213.2	3.8	Pastizal	XXX	XXX	A AC C	10YR2/1 10YR3/1 10YR4/6	5.5-6	¿?

La tabla contiene información no magnética sobre los suelos analizados en la región (VNT). Las columnas presentan de izquierda a derecha: El nombre de la localidad de estudio, el nombre y evolución pedológica fundamental del perfil analizado, las coordenadas donde se encuentra el perfil pedológico, los valores medios anuales de los registros de precipitación (PMA) y temperatura (TMA), así como datos sobre el tipo de cubierta vegetal (V), el drenaje (D), la estabilidad (E), la secuencia de horizontes (H), el color del perfil (C), el potencial de hidrógeno (pH), y del cociente limo/arcilla (L/A). El color se determinó en húmedo (H) de acuerdo a las tablas Munsell (2000). El cociente L/A relaciona a los minerales susceptibles a ser intemperizados (limo) y el material secundario derivado del intemperismo (arcilla). La simbología (X) relaciona cualitativamente de condiciones óptimas y/o buenas (XXXXXX) a las menos favorables y/o escasas (X) respectivamente.

RESULTADOS

“El amor acepta que cada uno tiene dones diferentes y distintos caminos de vida. Entonces procura descubrir su propio camino para ser feliz, dejando que los demás encuentren el suyo”

AMORIS LAETITA
(Santo Padre Francisco)

Capítulo 5

5 Resultados

5.1 Valle de Teotihuacán

5.1.1 Curvas k vs T

Los suelos estudiados en esta región presentan curvas (k vs T) con tendencias similares dentro de cada suelo, aunque con algunas ligeras diferencias entre ellos (**Figuras 13 a-j**). Éstas permiten identificar, de manera general, dos tipos de comportamientos. El primero está asociado con los Cambisoles de la localidad de cerro Gordo (CGBE y CGN), que presenta gráficas con un mayor y evidente grado de irreversibilidad dentro de sus horizontes superficiales (**Figuras 13a, c**) donde las muestras durante el enfriamiento se incrementan (k) con respecto al proceso de calentamiento, mientras que para los horizontes B las curvas son más reversibles y presentan un pérdida mínima de susceptibilidad (**Figuras 13b, d**).

En CGBE resaltan los cambios de la gráfica del horizonte Ah durante el calentamiento alrededor de los 250-300°C y el decremento gradual hasta los 580°C aproximadamente, con una ligera inflexión alrededor de los 500°C (**Figura 13a**). En el horizonte Bw se observa la tendencia creciente desde el inicio del calentamiento hasta los 350°C, con un decremento abrupto de pendiente alrededor de los 625°C (**Figura 13b**). En el caso de CGN, los cambios de pendientes también están mejor definidos para la parte superficial del suelo, donde resalta el aumento gradual de k desde el inicio del calentamiento con una inflexión alrededor de 150°C, un incremento en 250°C (**Figura 13c**), decreciendo gradualmente hasta los 550°C. Para el horizonte BC (**Figura 13d**) los cambios de pendiente son más sutiles, y tienden a presentarse en los mismos intervalos de temperatura. El segundo grupo de curvas lo componen los perfiles MAS (Calcisol) y SNP (Fluvisol) respectivamente, los cuales muestran gráficas relativamente parecidas entre sí (**Figuras 13e, f, y 13g-h**). Presentan un grado de irreversibilidad de moderada a baja, siendo más homogéneo para el Fluvisol (**Figuras 13g-h**), incrementándose los valores de k en ambos suelos durante la etapa de enfriamiento con respecto a la de calentamiento. Los gráficos de este segundo grupo suelen presentar un decremento abrupto de k alrededor de los 100-120°C (**Figuras 13f-h**), con un aumento ligero a temperaturas que oscilan entre 200-350°C, decreciendo gradualmente hasta los 550°C

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

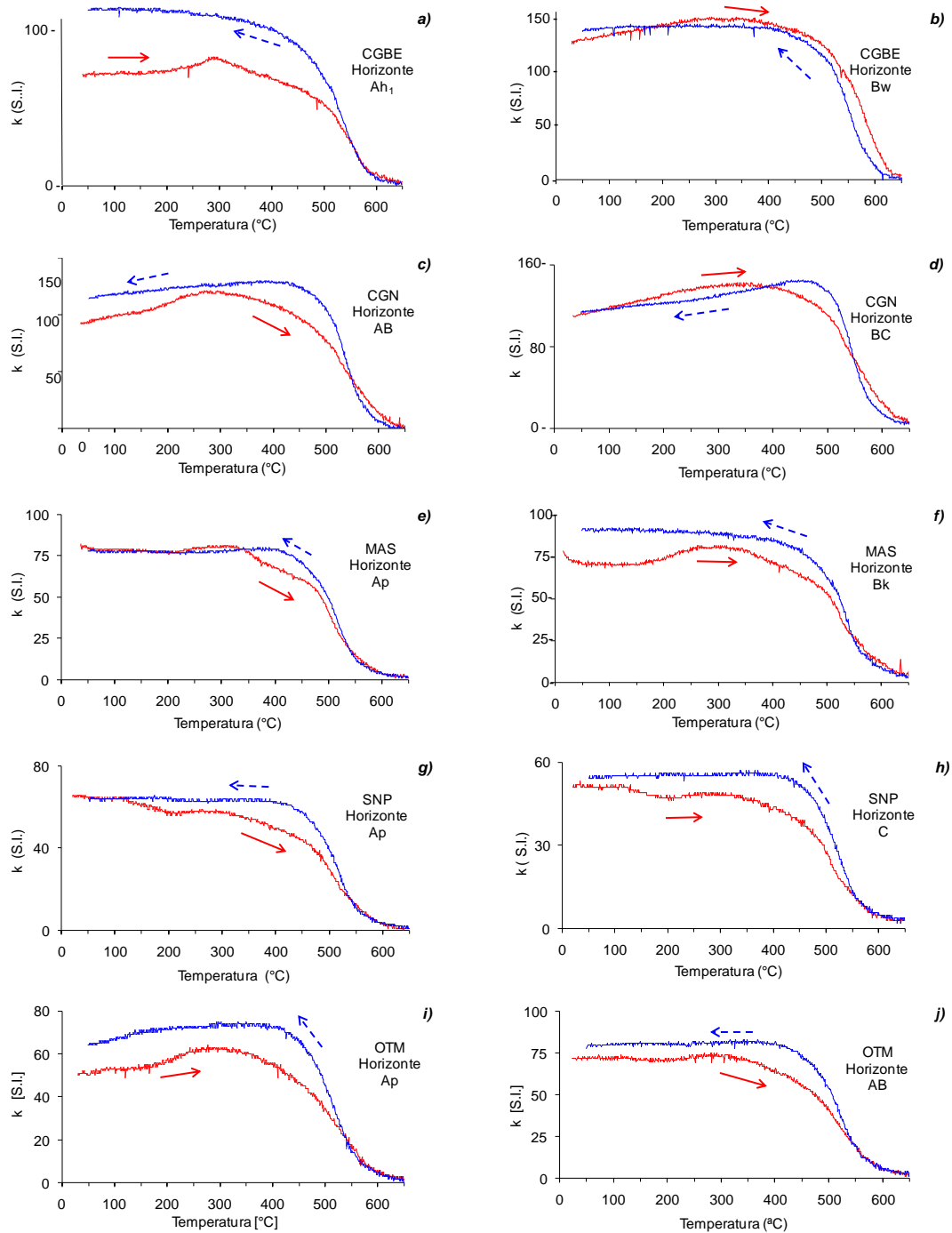


Figura 13- Curvas k vs T de los perfiles pedológicos estudiados en la región 1, el valle de Teotihuacán (VT). La figura está compuesta por gráficas con las tendencias representativas de los experimentos. La curva en color rojo indica el calentamiento (flecha continua, a la derecha) y en azul la etapa de enfriamiento (flecha discontinua, a la izquierda). Los perfiles CGBE y CGN son Cambisoles (localizados la cima y la ladera del cerro Gordo), respectivamente. El perfil MAS es un Calcisol (San Martín de las Pirámides) y los perfiles SNP y OTM son Fluvisoles, (ubicados en San Pablo y Otumba respectivamente). Las variaciones en las pendientes de las curvas son asociados con cambios en la temperatura crítica (T_C , T_N , p.ej., 580°C - Mgt) de minerales magnéticos, que se utilizan para inferir la composición de las partículas magnéticas del suelo.

aproximadamente (**Figuras 13e,h**). A diferencia de los Cambisoles, los horizontes superficiales en ambos suelos son relativamente más reversibles (**Figuras 13e, g**).

En el caso del perfil OTM (Fluvisol), las curvas (k vs T) tienen una mezcla que son análogas a la descritas previamente (Cambisoles), para el horizonte superficial, donde son más irreversibles, con cambios abruptos de pendiente alrededor de 200, 350 y 580°C durante la etapa de calentamiento y con un aumento de k en el enfriamiento (**Figuras 13i, j**). En el caso del horizonte AB, el comportamiento es más parecido al que se observa para el Calcisol y el Fluvisol respectivamente (**Figura 13j**). Tiene una mayor reversibilidad con respecto al horizonte Ap, y los cambios de pendiente de su curva son más suaves aunque tienden a registrarse en los mismos intervalos de temperatura que tienen el segundo grupo de curvas descritas previamente.

5.1.2 Curvas de adquisición de IRM y ciclos de histéresis

Por otro lado, las curvas de adquisición de IRM muestran gráficas similares en todos los perfiles y se caracterizan en su mayoría, por registra un incremento alrededor de los 200-250 mT saturándose en general a campos menores de 400 mT (**Figuras 14 a-e**). Otro rasgo que resalta es el ligero incremento (<2%) que registran alrededor en campos que oscilan entre 150-350 mT, y una separación de los suelos en función de una pseudo “inversión” de las remanencias en los suelos que les permite agruparlos en 1) los perfiles CGN y OTM que registran una mayor remanencia en los horizontes superficiales con respecto a los horizontes inferiores de cada perfil (**Figuras 14 b, e**) y 2) los demás suelos (CGBE, MAS y SNP) en los que ocurre lo contrario (**Figuras 14 a, c, d**) respectivamente.

Con respecto a los ciclos de histéresis, éstos son similares dentro de cada perfil, y en general se saturan a campos bajos ($H < 300$ mT), aunque presentan ligeras diferencias entre ellos (**Figuras 14f,j**). Éstas permiten separar a los suelos en dos grupos principales: 1) los perfiles CGBE y CGN, ambos Cambisoles (**Figuras 14f, g**), con ciclos con una relativa mayor cuadratura y estabilidad (*Maher y Thompson, 1999, p.ej.*), mayor para CGBE y 2) el resto de los perfiles MAS (Calcisol), SNP y OTM (Fluvisoles) respectivamente (**Figuras 14h,j**), con ciclos más estrechos, con una pseudo forma de avispa (*Dunlop 2002 y 2006*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

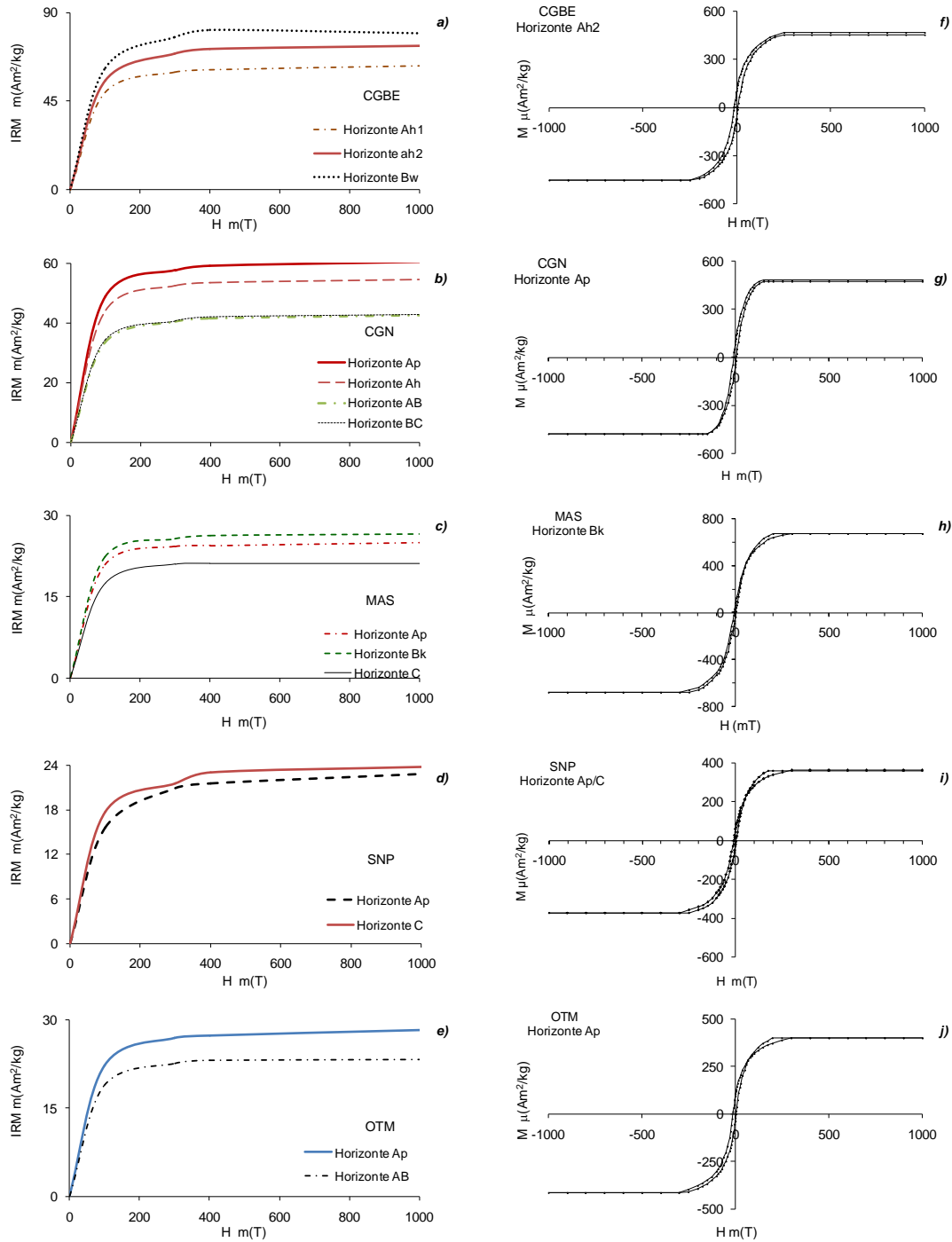


Figura 14.- Curvas de adquisición de la magnetización isoterma remanente (IRM) y ciclos de histéresis para los suelos estudiados en el valle de Teotihuacán. La figura presenta las gráficas con tendencias representativas de: las curvas de IRM (a-e). Una pendiente suave corresponde a muestras con una mayor coercitividad, curvas que no se saturan y que son asociadas con minerales de tipo goethita, Gth y hematita, Hmt, mientras que minerales con pendiente abrupta y que saturan a campos bajos son interpretados como un registro de minerales magnéticamente suaves. En los ciclos de histéresis (h-j), abiertos son asociados con minerales magnéticamente duros (Hmt, p.ej.). La estabilidad y cuadratura de los ciclos son utilizadas para inferir información sobre la composición y dominio de las partículas magnéticas (Maher y Thompson, 1999; Dunlop, 2002 y 2006 p.ej.).

5.1.3 Perfiles magnéticos CGBE

(Cambisol, Cerro Gordo, cima)

Las gráficas de los parámetros magnéticos muestran una estrecha similitud entre ellos, siendo además consistentes para cada subconjunto de perfiles que integran la terna (concentración, dominio, dureza de las partículas magnéticas) de propiedades magnéticas analizadas (**Figuras 15 a-p**). En ellos resalta de manera generalizada, la tendencia a incrementarse hacia el fondo del suelo, con los valores más altos de éstos.

Los parámetros de concentración registran los valores más bajos en la parte superficial del horizonte Ah₁, incrementándose gradualmente (**Figuras 15a-f**). Se observa que las variaciones, relativamente más abruptas corresponden con el cambio de los horizontes, siendo éstas más evidentes en la transición entre horizontes. En la parte superior del horizontes Ah, los perfiles de χ y $\Delta\chi$ son homogéneos relativamente, mientras que el máximo se registra dentro del horizonte Bw (**Figuras 15a,b**). En Ah₁ NRM muestra los valores más bajos (son también bajos para ARM y SIRM_{IT}), mientras que en la parte media del horizonte Bw existe un decremento abrupto, tendencia opuesta a la que registran el resto de los parámetros de éste subconjunto de parámetros magnéticos en el mismo horizonte (**Figura 15c**).

Por otro lado, los parámetros relacionados con los dominios magnéticos reflejan una mayor diversidad relativa de comportamientos en sus perfiles magnéticos, aunque estos también resultan congruentes entre sí, como en los parámetros previamente descritos (**Figuras 15f-j**). De forma general, en ellos se resaltan pocas y suaves variaciones en sus curvas, y se pueden separar de acuerdo con sus relativas similitudes en tres grupos: 1) $\chi_{fd\%}$ y χ_{ARM} que tienen una tendencia creciente, con los valores más altos ubicados en la parte inferior del perfil (**Figuras 15g, i**), 2) ARM/IRM₁₀₀ y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ que presentan tendencias decrecientes a lo largo del suelo, con un ligero repunte en la parte media del horizonte Bw (**Figuras 15h,i**) y 3) SIRM_{IT}/ χ que aunque muestra una relativa semejanza con el subgrupo (2) descrito arriba, en éste se sobresalen los cambios en la tendencia en los horizontes (**Figura 15f**). Presenta un decremento con respecto al resto de los parámetros magnéticos dentro del horizonte Bw (parte media).

Con respecto a los parámetros de coercitividad ò dureza magnética, éstos poseen curvas homogéneas, similares entre sí, con pocas y suaves variaciones (**Figuras 15k-p**). La mayoría de éstas registran tendencias crecientes, aunque es posible observar algunas ligeras diferencias, que reflejan la sensibilidad de los parámetros magnéticos. Los valores más bajos de los perfiles

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

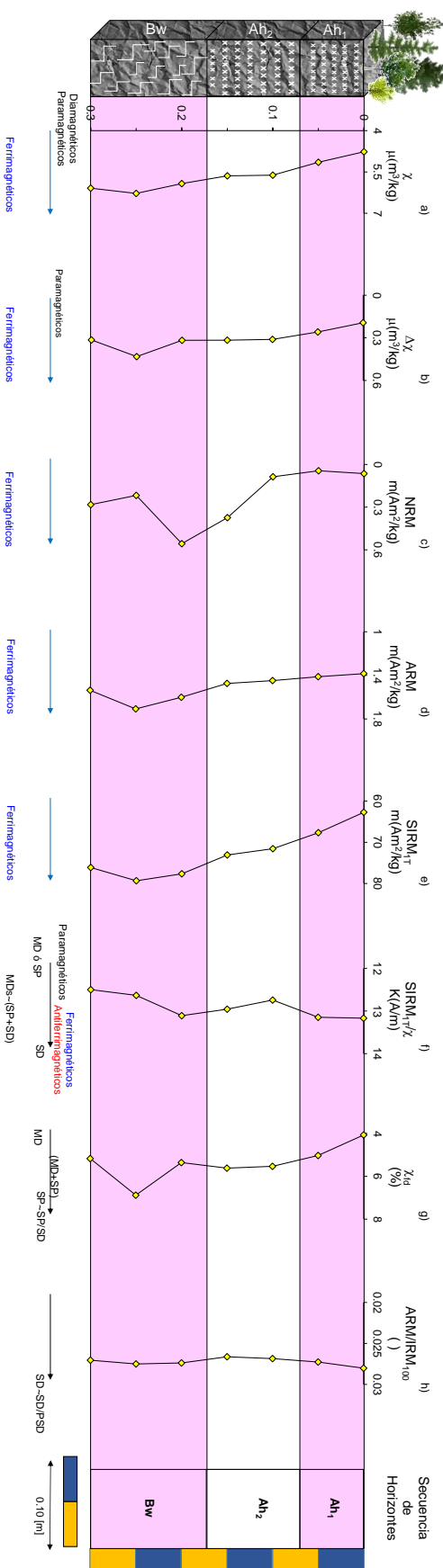


Figura 15. Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en CGBE. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad de cerro Gordo, dentro de la región 1 en el valle de Teotihuacán (VT). Este suelo se ha clasificado como un Cambisol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/ó la fotografía del mismo (Figura 15- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f^o), el tamaño de dominio (perfiles f^o-j), así como el espectro de coercitividad ó dureza (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil $\text{SIRM}_T r^2$ (f^o) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración-dominio). Las siglas MDS se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (magnetita, Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (goethita, Gth y/ó hematita, Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros, ver Apéndice).

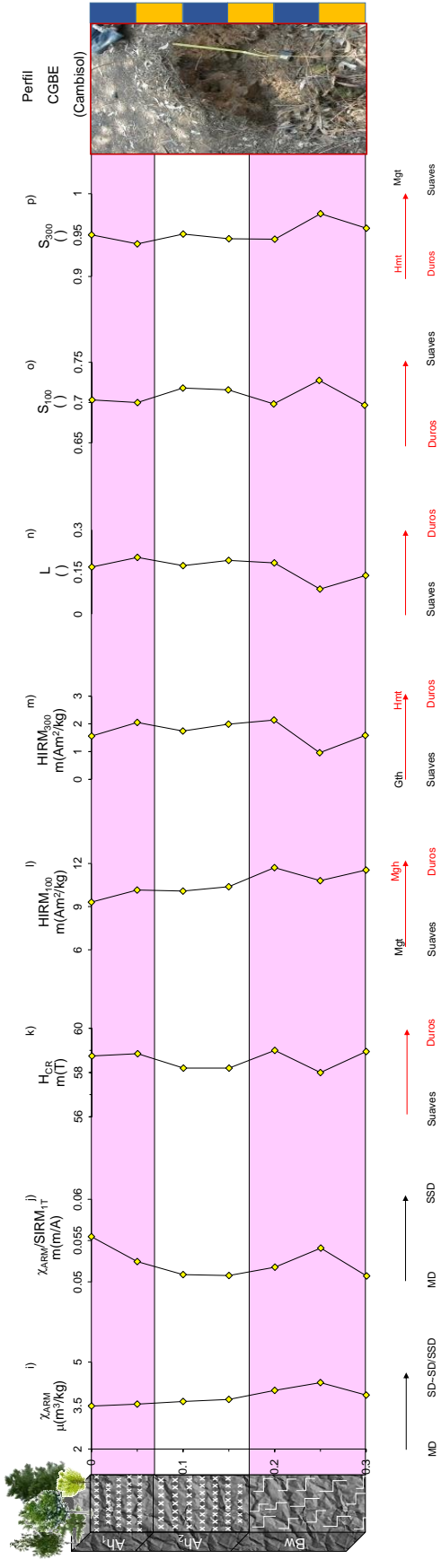


Figura 15 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en CGBE.

magnéticos se ubican en la parte superior del horizonte Ah₁, excepto en los cocientes S, donde existe una ligera tendencia decreciente (**Figuras 15o-p**).

Las gráficas de H_{CR} (**Figura 15 k**) y S (**Figuras 15o, p**) son relativamente constantes dentro del horizonte Ah₂ después de registrar un ligero decremento. En el resto de los parámetros estos aumentan, siendo los cambios más claros en S₁₀₀. En el horizonte Bw los perfiles de H_{CR} y HIRM son similares entre sí (**Figuras 15k-m**) y ~ con L, aunque éste último con una tendencia más suave (**Figura 15n**). Es decir, aumenta en la parte superior (Bw), tiene un decremento abrupto en la parte media del horizonte, registrando un repunte en el fondo. El comportamiento opuesto se registra para los perfiles S dentro del mismo horizonte.

5.1.4 Perfiles magnéticos de CGN

(Cambisol, cerro Gordo, ladera)

De manera general, los perfiles magnéticos de este suelo son parecidos y congruentes entre sí, se caracterizan porque muestran pocas y suaves variaciones a lo largo de la unidad pedoestratigráfica (**Figuras 16a-p**).

De acuerdo con sus gráficos, los parámetros de concentración se pueden reagrupar en tres tipos diferentes de tendencias: 1) los perfiles magnéticos de χ (**Figura 16a**), ARM (**Figura 16d**) y SIRM_{IT} (**Figura 16e**) que tienen una tendencia decreciente, con los valores más altos en la parte superficial del horizonte Ap, disminuyen hacia la parte inferior y se incrementan con un gradiente diferido posteriormente. Es decir, los cambios de pendiente hacia un incremento gradual en sus curvas comienzan a partir de la región media del horizonte AB para χ , en AB/BC para ARM, así como en la parte superficial de BC para SIRM_{IT} respectivamente. El segundo grupo de parámetros lo integra el perfil magnético de $\Delta\chi$ y NRM (**Figuras 16b,c**), con una curva homogénea, con pocas y suaves variaciones y una tendencia ~ constante. El primero muestra ligeros repuntes en la parte superior del horizonte Ap y en el fondo del perfil, así como un cambio abrupto en Ah/AB, mientras que en el segundo, su gráfico es casi constante (a lo largo de los horizontes Ap-AB). Con el incremento abrupto que se observa en la transición AB/BC se inicia la tendencia creciente dentro del perfil magnético, mismo que persiste hasta el fondo del suelo, donde existe un decremento abrupto. El último grupo lo conforma el parámetro SIRM_{IT}/ χ (**Figura 16f**) el cual tiene una tendencia creciente a lo largo del suelo, con valores más bajos, homogéneos y relativamente constantes en la parte superficial (horizontes Ap-Ah). Registra una clara y abrupta variación en la

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

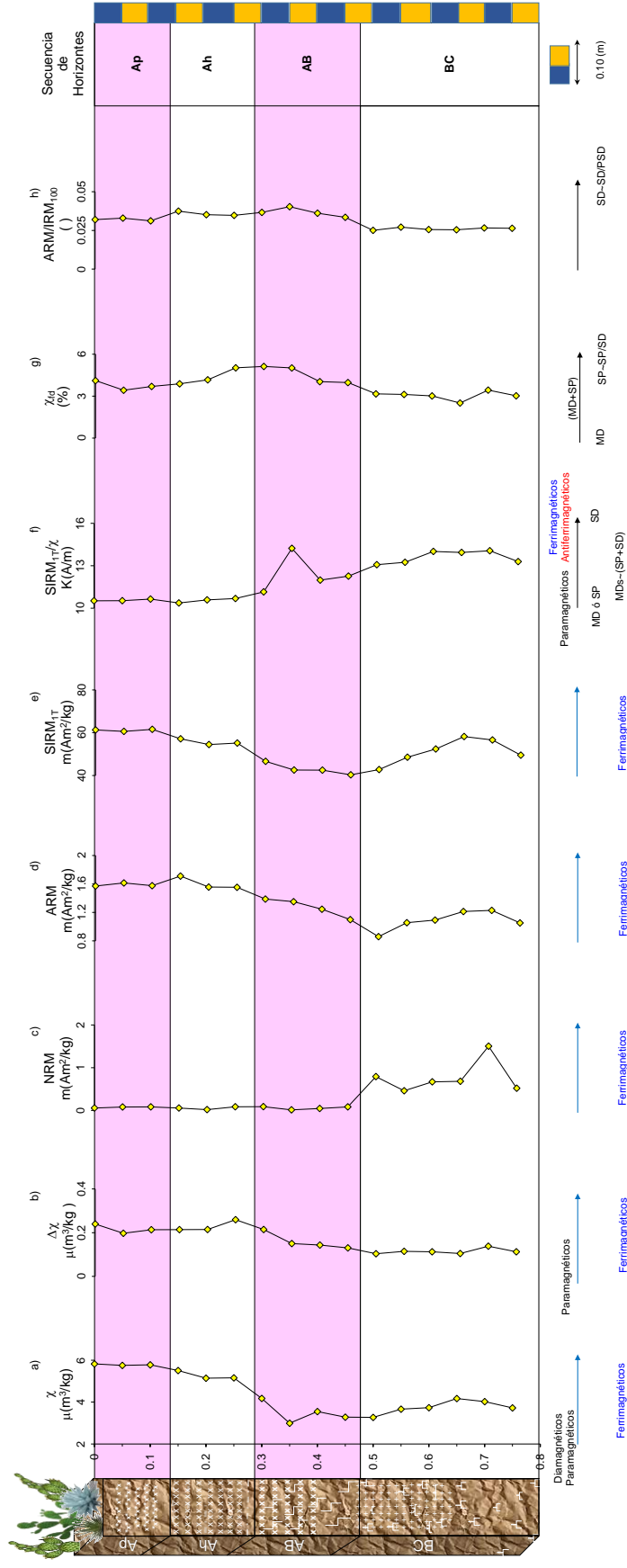


Figura 16.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en CGN. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad de cerro Gordo, dentro de la región 1 en el valle de Teotihuacán (VT). Este suelo se ha clasificado como un Cambisol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/o la fotografía del mismo (Figura 16.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f’), el tamaño de dominio (perfiles f’-j), así como el espectro de coercitividad ó *dureza* (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil SIRM_{irr}/χ (f’’) denota la sensibilidad del cociente magnético sobre su comportamiento ~MD. La dureza de las partículas intrínsecas del suelo (concentración-dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Gth y/o Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros. ver *Apéndice*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

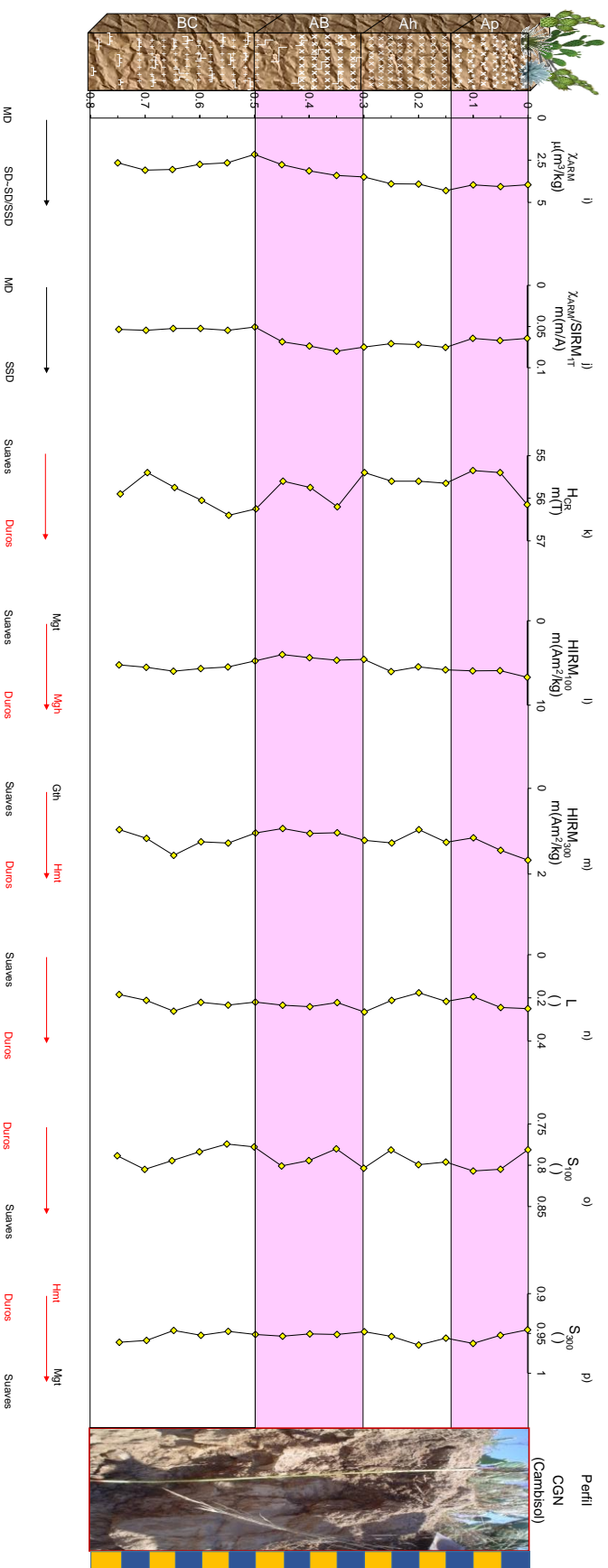


Figura 16 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en CGN.

parte media del horizonte AB, y posteriormente aumenta gradualmente hasta el final del perfil, donde existe un suave decremento.

En el caso de los parámetros magnéticos de dominio magnético (**Figuras 16g-j**), éstos muestran también pocos y suaves cambios en sus gráficos, análogo a lo que se observa en los perfiles de concentración magnética y, separándose también en tres grupos diferentes: 1) $\chi_{fd\%}$, que tiene una tendencia creciente (horizontes Ap-AB/2), decreciendo después hasta el fondo del suelo, donde se observa un cambio abrupto (**Figura 16g**). Los parámetros ARM/IRM₁₀₀ y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$, integran el segundo grupo, poseen gráficas similares con una tendencia creciente desde el horizonte Ap hasta la región media del horizonte AB (**Figuras 16h, j**). Tienen un suave incremento en la transición Ap/AB, después decrecen hasta el límite entre los horizontes AB/BC, y finalmente, dentro de este último horizonte, se mantienen relativamente homogéneos y constantes los perfiles magnéticos. El último grupo corresponde al parámetro χ_{ARM} , que decrece a partir del horizonte Ah, mientras que en el resto de los horizontes el perfil magnético se incrementa (**Figura 16i**).

Los parámetros de la dureza magnética ó coercitividad muestran curvas semejantes con escasas variaciones en la mayoría de estas, resaltando tres tipos de comportamientos diferentes, semejante a lo que ocurre con el resto de los perfiles magnéticos descritos previamente. El primer subgrupo corresponde al gráfico de H_{CR}, que registra las variaciones más claras y abruptas así como una tendencia, en general decreciente, excepto en el horizonte Ap (superficial), AB en la parte media, y BC (parte superior), con un ligero repunte en el fondo del suelo (**Figura 16k**). El segundo grupo lo integran los perfiles HIRM y L cuyas curvas son semejantes entre sí, decrecen gradualmente con pocos y suaves cambios, incrementándose a partir de la transición entre los horizontes AB/BC (**Figuras 16l-n**). En el caso los cocientes S (**Figuras 16o-p**), estos son relativamente homogéneos y tienen comportamientos ~ opuestos a los que se observan en HIRM y L respectivamente.

5.1.5 Perfiles magnéticos de MAS

(Calcosol, San Martín de las Pirámides)

La mayor parte de las curvas de concentración magnética presentan gráficas con pocas y suaves variaciones a lo largo del perfil (**Figuras 17a-p**), sobresaliendo las curvas de χ y SIRM_{IT} que muestran los cambios mejor definidos (**Figuras 17a,e**). De acuerdo con sus comportamientos se pueden agrupar, en general, en tres tipos diferentes de acuerdo con sus tendencias: 1) χ y $\Delta\chi$ disminuyen dentro del horizonte Bk con diversas variaciones hasta la parte baja del horizonte,

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

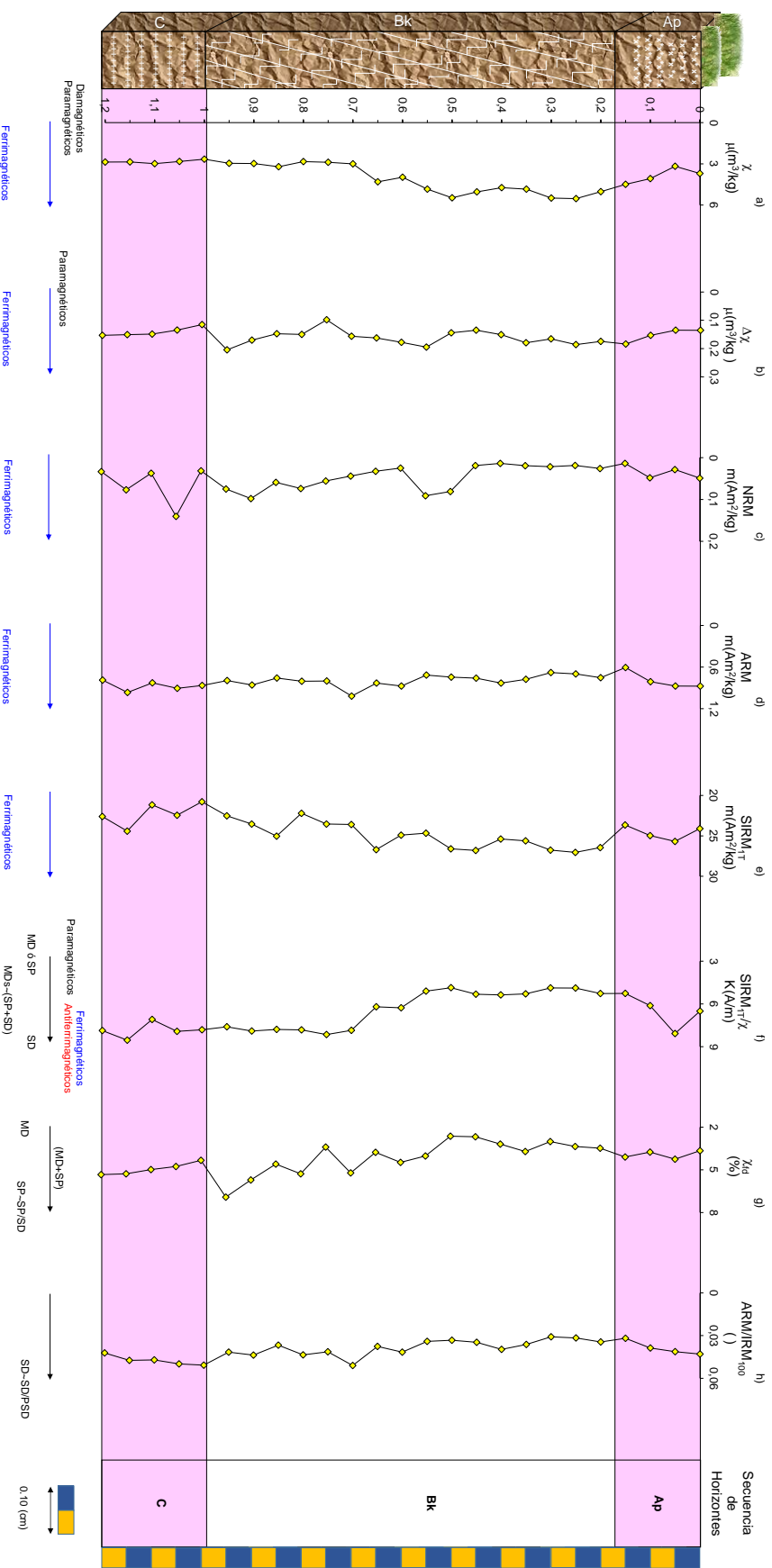


Figura 17.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en MAS. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad de San Martín de las Pirámides, dentro de la región I en el valle de Teotihuacán (VT). Este suelo se ha clasificado como un Calcisol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/o la fotografía del mismo (Figura 17.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f), el tamaño de dominio (perfiles f-j), así como el espectro de coercitvidades o *dureza* (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil SIRM_{1T}/χ (f*) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre las propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración-dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgf., p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Gth y/o Hmt, p.ej.,). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros, ver Apéndice).

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

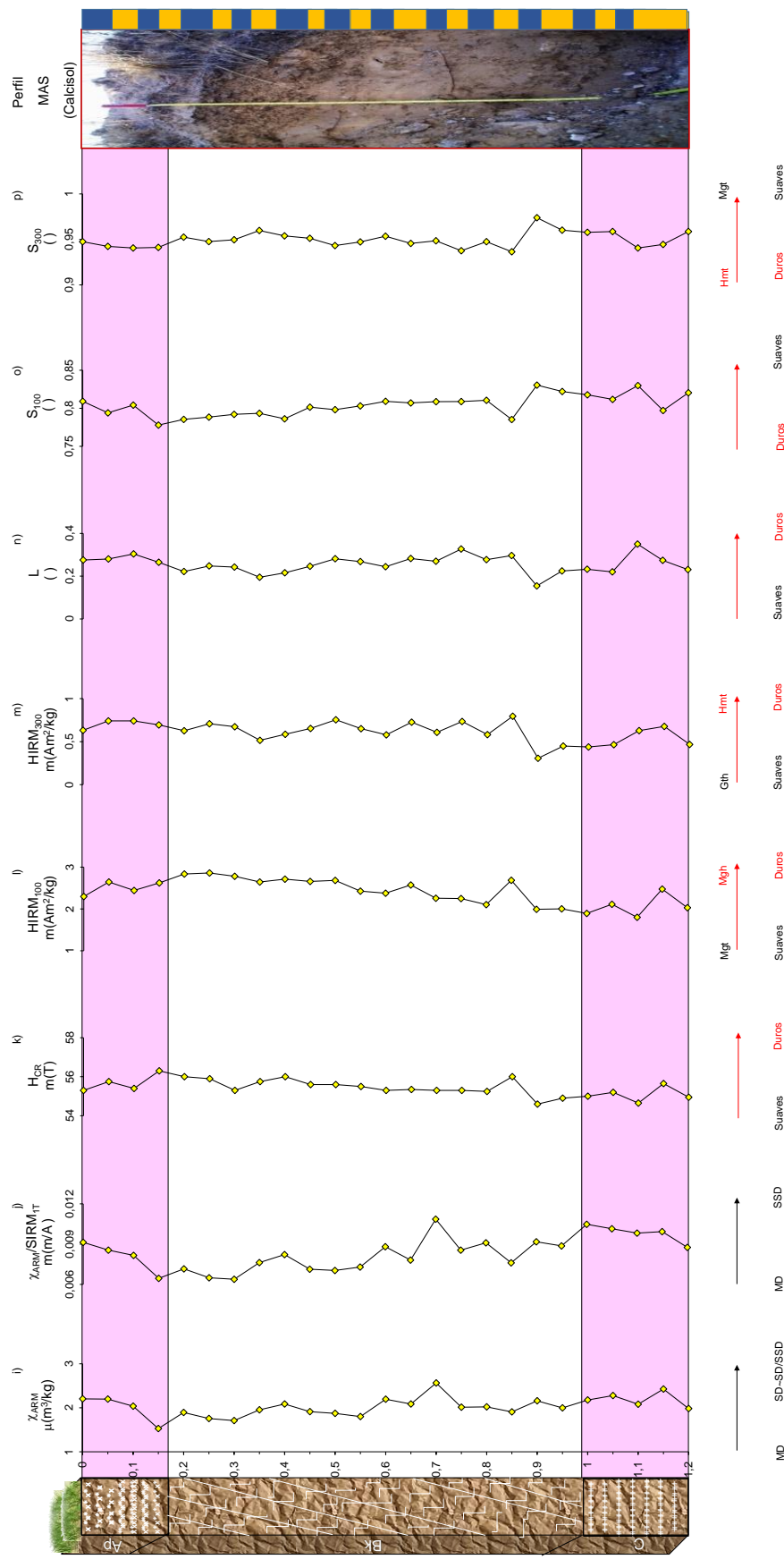


Figura 17 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en MAS.

donde χ se mantiene constante hasta el fondo del suelo, mientras que $\Delta\chi$ tiende a incrementarse (**Figuras 17a,b**). Los parámetros NRM (**Figura 17c**), ARM (**Figura 17d**) y SIRM_{1T}/χ (**Figura 17f**) presentan curvas relativamente similares entre sí, que muestran los valores más bajos, relativamente, en la parte superior (horizonte Bk) e incrementándose posteriormente. Esto es más evidente para NRM, donde los cambios son más abruptos se ubican en la transición entre los horizontes Bk/C y C respectivamente. El tercer grupo lo conforma el parámetro SIRM_{1T} que posee la curva con mayor variabilidad y una tendencia decreciente con un comportamiento opuesto al que se observa en SIRM_{1T}/χ dentro del horizonte Bk (**Figura 17e**).

Por otro lado, en el caso de los perfiles magnéticos relacionados con los dominios magnéticos son más homogéneos, con curvas similares entre sí que se caracterizan, en general por sus pocos, suaves y graduales cambios (**Figuras 17g-j**). Presentan una tendencia decreciente en horizonte Ap hasta la parte superior del horizonte Bk, con una posterior tendencia relativa a incrementarse suavemente hasta el final del perfil con frecuentes cambios abruptos en $\chi_{fd\%}$ (**Figura 17g**). El resto de los perfiles magnéticos (ARM/IRM₁₀₀, χ_{ARM} , y $\chi_{ARM}/\text{SIRM}_{1T}$) en la misma región del suelo, son casi constantes observándose que se conserva de forma relativa las tendencias que existen en el parámetro previamente descrito (**Figuras 17h-j**).

En cuanto a las coercitividades, las gráficas tienen pocas y suaves variaciones dentro del suelo para la mayor parte de éstas, con excepción de HIRM₃₀₀ que muestra los cambios relativamente más frecuentes e intensos dentro del horizonte Bk (**Figura 17m**). H_{CR} tiene cambios abruptos dentro del horizonte Ap y C (**Figura 17k**). Los parámetros HIRM y L tienen comportamientos similares (**Figuras 17l-n**), con una tendencia más suave y decreciente HIRM₁₀₀ (**Figura 17l**). En la parte baja del horizonte Ap, éstos registran tendencias opuestas. Con respecto a los cocientes S (**Figuras 17o, p**) éstos tienen curvas semejantes entre sí, con tendencias contrarias, en general, a las que se observan en los perfiles de HIRM. Dentro del horizonte C, S₁₀₀ (**Figura 17o**) tiene un gráfico cuyo comportamiento es opuesto al que se registra en L.

5.1.6 Perfiles magnéticos SNP

(Fluvisol, San Pablo)

Los parámetros magnéticos de este suelo muestran pocas variaciones en la mayor parte de sus gráficas, mismas que tienden a ser similares, con pocos y suaves variaciones a lo largo del perfil (**Figuras 18a-p**), excepto por χ y SIRM_{1T} que reflejan cambios más frecuentes.

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

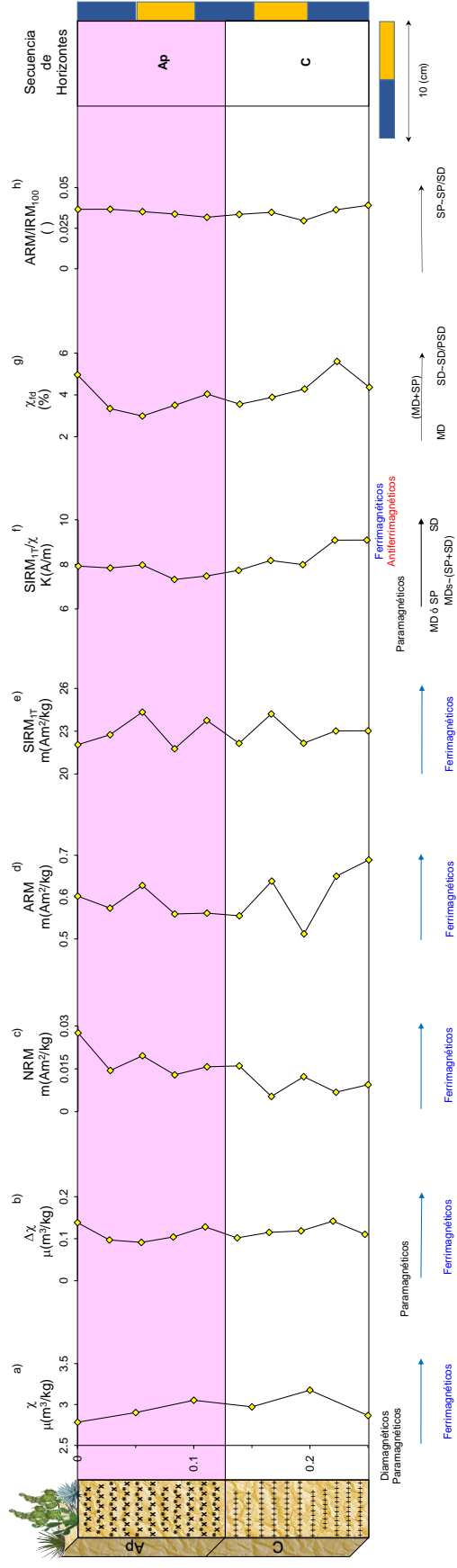


Figura 18.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en SNP. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad de San Pablo, dentro de la región I en el valle de Teotihuacán (VT). Este suelo se ha clasificado como un Fluvisol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/o la fotografía del mismo (Figura 18.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f), el tamaño de dominio (perfiles f⁺-f⁻), así como el espectro de coercitividad ó *dureza* (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil SIRM_{TR}/χ (f⁺) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración-dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Cth y/o Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros. ver *Apéndice*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

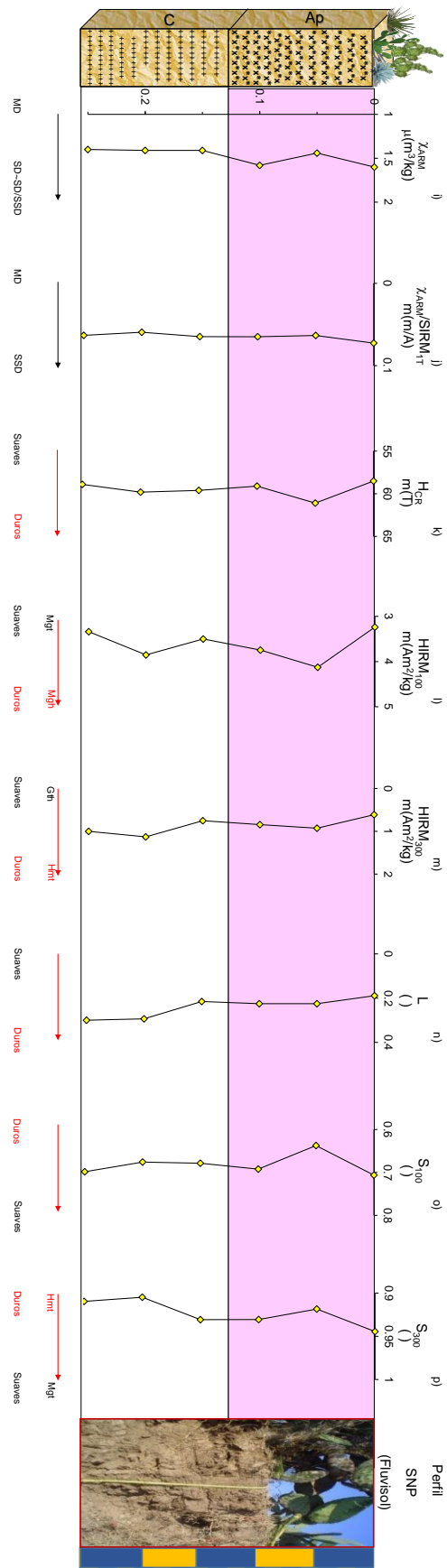


Figura 18 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en SNP.

Los perfiles de concentración magnética del suelo (**Figuras 18a-f**) aumentan dentro del horizonte Ap con los valores más bajos ubicados en la parte superficial de los parámetros χ (**Figura 18a**) y $SIRM_{IT}$ (**Figura 18e**). En la misma región, los demás parámetros ($\Delta\chi$, NRM y ARM) decrecen, mientras que en la parte baja (Ap/C) todos los gráficos se incrementan, resaltando el cambio abrupto en la parte media de Ap (**Figuras 18b-d**). $SIRM_{IT}/\chi$ (**Figura 18f**) es el único parámetro que refleja una tendencia creciente dentro de todo el suelo, con un cambio en la transición entre horizontes (Ap/C).

En el caso de los perfiles de dominio magnético, éstos muestran curvas cuyos comportamientos son relativamente similares (**Figura 18g-j**). De manera general, disminuyen dentro del horizonte Ap (superficial), aunque en $\chi_{fd\%}$ se incrementan posteriormente hasta el final del suelo (**Figura 18g**). En ARM/IRM_{100} decrece dentro del horizonte C, donde el comportamiento es opuesto con respecto al parámetro previamente descrito para la misma zona (**Figura 18h**). En el caso de χ_{ARM} (**Figura 18i**) y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ (**Figura 18j**) se presentan comportamientos muy semejantes, homogéneos (relativamente) y constantes dentro del horizonte C respectivamente.

Por otro lado, en el caso las curvas asociadas con las coercitividades, éstas poseen comportamientos semejantes, con tendencias crecientes, pocas y suaves variaciones a lo largo del suelo (**Figura 18k-p**). En el horizonte Ap, H_{CR} (**Figura 18k**) $HIRM$ (**Figuras 18l, m**) y L (**Figura 18n**) aumentan, registrando los valores más bajos hacia la parte superficial, con un ligero decremento en la transición con el horizonte C, y resaltando el cambio abrupto en la parte media de A. Dentro del horizonte C se preservan los mismos patrones que se observan en el horizonte superior, aunque con una relativa mayor intensidad.

5.1.7. Perfiles magnéticos de OTM

(Fluvisol, Otumba)

Las gráficas del suelo muestran comportamientos similares entre sí, que se caracterizan por tener pocas y suaves variaciones en todo el suelo para la mayoría de éstas (**Figuras 19a-p**), con excepción de NRM (**Figura 19c**), $SIRM_{IT}$ (**Figura 19e**) y S_{300} (**Figura 19p**) que presentan una relativa mayor variabilidad.

De acuerdo con las tendencias que se observan en los perfiles de concentración, éstos se pueden agrupar en tres tipos diferentes: 1) χ (**Figura 19a**), NRM (**Figura 19c**) y $SIRM_{IT}$ (**Figura 19e**) que de manera general decrecen hasta la parte superficial de AB, donde resaltan el suave repunte en la parte superficial de Ap (NRM) que no se observa para el resto de los parámetros

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas en Secuencias Volcánicas como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

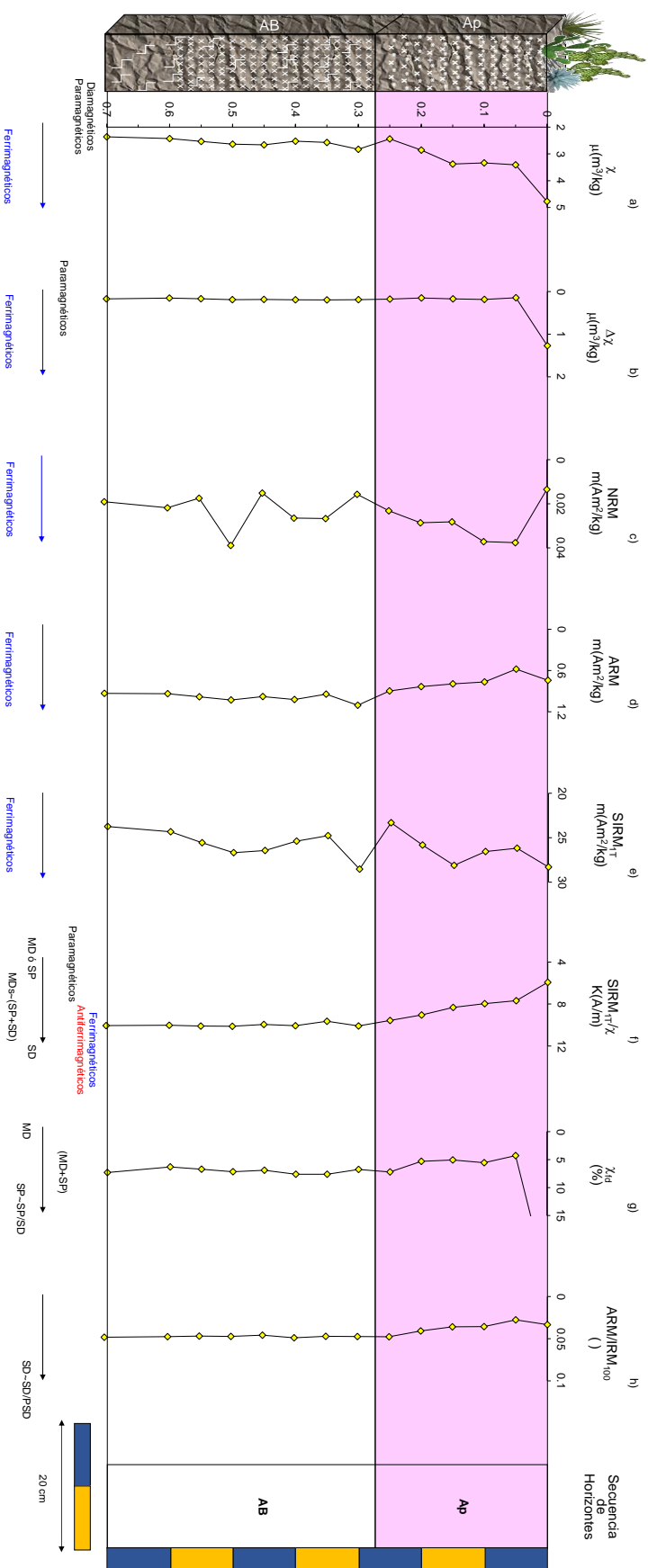


Figura 19. Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en OTM. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad de Olumba, dentro de la región I en el valle de Teotihuacán (VT). Este suelo se ha clasificado como un Fluvisol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/ó la fotografía del mismo (Figura 19 - continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-F⁺), el tamaño de dominio (perfiles F^{-j}), así como el espectro de coercitividad ó *dureza* (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil SIRM_T (F⁺) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración-dominio). Las siglas MDS se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP₊SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mg₂, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Gh y/ó Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros, ver Apéndice).

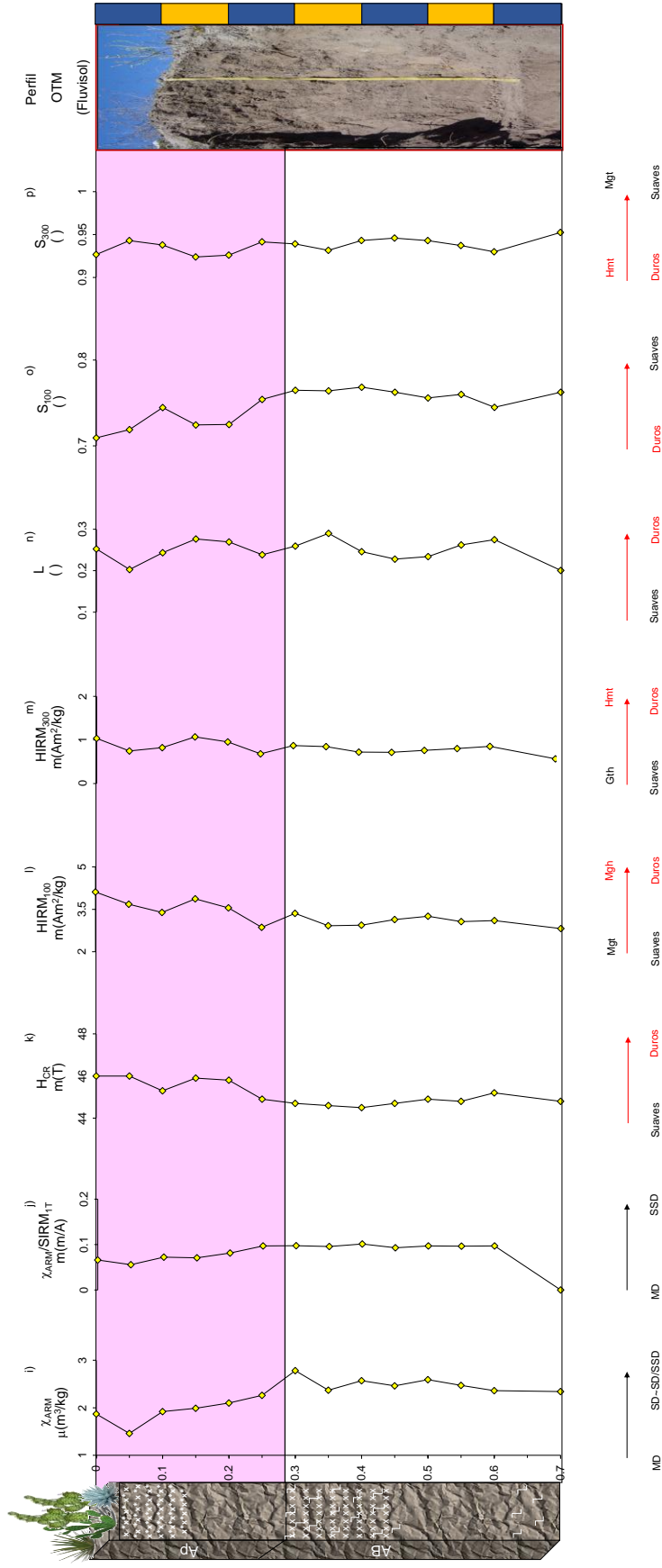


Figura 19 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en OTM.

(decremento), con un comportamiento \sim constante en la parte media. Dentro del horizonte AB, χ tiene una suave tendencia creciente que es análoga en $SIRM_{IT}$ aunque solo en la parte baja del horizonte (**Figura 19a, e**), registrándose mejor las variaciones en este último parámetro con un cambio abrupto en la parte superficial del horizonte. El segundo grupo lo conforma el parámetro $\Delta\chi$, que con excepción de la parte superficial del horizonte Ap (donde registra un incremento abrupto), presenta una gráfica \sim constante (**Figura 19 b**). El último grupo de curvas lo integran los perfiles de ARM y $SIRM_{IT}/\chi$ que se incrementan desde la parte superficial del suelo hasta la región superior de AB, con una tendencia casi constante hasta el fondo del suelo posteriormente (**Figuras 19d,f**).

Por otro lado, los perfiles de dominios magnéticos (**Figuras 19g,j**) muestran una estrecha semejanza entre sí, con pocas y graduales variaciones a lo largo del suelo para la mayoría de las curvas. En éstas, prevalecen las tendencias crecientes desde la superficie del horizonte Ap hasta la región superior del horizonte AB, y posteriormente presentan un comportamiento constante. Resalta el suave aumento que se observa en la parte superior de AB en $\chi_{fd\%}$ y χ_{ARM} (**Figuras 19g,i**), así como el comportamiento opuesto que existe en la parte baja del horizonte en $\chi_{fd\%}$ y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$, con un decremento abrupto en el fondo en este último (**Figuras 19g, j**).

En el caso de los parámetros relacionados con las coercitividades ó dureza de las partículas magnéticas, éstos muestran de manera general, dos tendencias principales: 1) las curvas de H_{CR} (**Figura 19k**) y HIRM (**Figuras 19 l,m**), y 2) L (**Figura 19n**) y los cocientes S (**Figuras 19o,p**). En el primer grupo se registra una tendencia decreciente dentro del horizonte Ap que se mantiene hasta la parte superior del horizonte AB, con un suave cambio en la parte media del horizonte Ap, así como un ligero repunte en la transición de horizontes (Ap/AB), aproximadamente. En la región media del horizonte Ap, el perfil de $HIRM_{100}$ tiene un comportamiento opuesto con respecto a $HIRM_{300}$ (**Figuras 19l-m**). Después, dentro del horizonte AB las curvas de los parámetros magnéticos tienden a incrementarse de gradualmente, con pocas y suaves variaciones, resaltando un decremento abrupto en el fondo del suelo. El resto de los parámetros magnéticos (L y S) se caracterizan, de forma general, por su comportamiento opuesto al previamente descrito en los parámetros del primer grupo (**Figuras 19n-p**). Es decir, poseen una tendencia creciente a lo largo del suelo, con cambios mejor definidos en S_{300} (**Figura 19p**). La curva de L muestra un comportamiento opuesto con respecto a S a partir de región media del horizonte AB, misma que se conserva hasta el fondo del suelo (**Figura 19n**).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VT)

Tabla 8.- Valores registrados en algunos de los parámetros magnéticos de los suelos del valle de Teotihuacán.

Parámetro magnético	CGBE (Ah ₁ -Ah ₂ -Bw)	CGN (Ap-AB-BC-C)	MAS (Ap-Bk-C)	SNP (Ap-C)	OTM (Ap-AB)
χ $\mu(\text{m}^3/\text{kg})$	6,27	5,82	5,53	3,17	4,77
	2,99	2,99	2,65	2,53	2,36
	5,63	4,36	3,87	2,85	2,90
SIRM _{IT} m(Am ² /kg)	79,32	61,55	27,04	24,34	28,54
	62,73	40,28	20,77	21,76	23,31
	72,59	51,87	24,44	22,92	25,98
χ_{fd} (%)	6,88	5,12	6,91	5,6	26,60
	2,50	2,50	2,63	2,99	4,27
	5,37	3,79	4,23	4,05	7,88
ARM/IRM ₁₀₀ (-)	0,028	0,04	0,05	0,03	0,04
	0,026	0,02	0,03	0,02	0,02
	0,027	0,03	0,04	0,03	0,04
χ_{ARM} $\mu(\text{m}^3/\text{kg})$	4,29	4,30	2,56	1,73	2,78
	3,48	2,16	1,52	1,29	1,46
	3,79	3,32	2,03	1,50	2,25
H _{CR} m(T)	59,00	56,40	56,30	61,1	46
	58,00	55,35	54,60	58,5	44,5
	58,56	55,77	55,43	59,31	45,15
S ₁₀₀ (-)	0,72	0,80	0,83	0,70	0,76
	0,69	0,77	0,77	0,63	0,70
	0,70	0,79	0,80	0,68	0,74

La tabla contiene los valores obtenidos para una selección de los parámetros magnéticos analizados en los suelos de la región 1, (VT). De Izquierda a derecha: la primera columna corresponde con los parámetros magnéticos, de la segunda a la sexta columna corresponden a los valores obtenidos para cada perfil, mostrándose la secuencia de horizontes que componen a cada perfil. Los parámetros χ y SIRM_{IT} son utilizados como un registro de la concentración de las partículas magnéticas, mientras que $\chi_{fd\%}$, ARM/IRM₁₀₀ y χ_{ARM} con un registro del dominio magnético. Los parámetros H_{CR} y S₁₀₀ son un registro de la dureza y/o coercitividad de los granos magnéticos. Cada tercia de datos corresponde, de arriba hacia abajo, con los valores máximos, mínimos y promedio para cada parámetro dentro de cada suelo respectivamente. Los perfiles CGBE y CGN son Cambisoles, MAS es un Calcisol, mientras que SNP y OTM son Fluvisoles, respectivamente.

5.2 Glacis de Buenavista

5.2.1 Curvas k vs T

Para esta región, los comportamientos de las curvas k vs T son similares dentro de cada perfil (**Figuras 20a-h**), aunque muestran ligeras variaciones que permiten separar a los suelos en dos grupos principales: 1) el compuesto por los perfiles BV (Andosol) y AHLV (Luvisol) que presentan en su mayoría curvas moderadamente reversibles con un aumento de k durante el proceso de enfriamiento con respecto al proceso de calentamiento (**Figuras 20a-d**) y 2) los perfiles AHVT y SUVT, ambos Vertisoles que a diferencia de los suelos del primer grupo (**Figuras 20e-h**), como rasgo distintivo muestran una tendencia decreciente a lo largo de la etapa de calentamiento para ambos perfiles, así como un relativo mayor grado de reversibilidad.

El perfil BV muestra curvas más homogéneas a lo largo del suelo, con una tendencia creciente desde el inicio del calentamiento, con un aumento gradual hasta los 250-350°C, decreciendo posteriormente hasta el final del proceso con ligeros cambios de pendiente a temperaturas mayores a 550°C (**Figuras 20a,b**). En cambio, el perfil AHLV posee curvas diferentes. En el horizonte Ah se observa una curva irreversible que decrece gradualmente desde el inicio del calentamiento, con un repunte a temperaturas que oscilan entre 200-300°C, con un cambio de pendiente por arriba de los 600°C (**Figura 20c**). Para el horizonte Bt, la curva es más reversible, con tendencias similares a las que se presentan para el perfil BV, con cambios en la pendiente de la curva alrededor de 120, 250, 400-450 y 580°C durante la etapa de calentamiento (**Figura 20d**).

En el caso del perfil AHVT, el horizonte superficial es menos reversible, con cambios de pendientes durante el calentamiento a temperaturas que fluctúan alrededor de 80-100°C y 200°C, registrando un aumento de k durante el proceso de enfriado y cambios alrededor de 550 y 100°C respectivamente (**Figuras 20e**). Aunque los intervalos de temperatura para los cambios de pendiente en las curvas del horizonte inferior se mantienen para el calentamiento, éstos están mejor definidos (**Figura 20f**). A diferencia del horizonte superior la reversibilidad se mantiene hasta los 250°C respectivamente durante el enfriamiento, registrando un decremento en k. En el caso de SUVT, los valores de k son menores con respecto a los que registra AHVT, aunque los cambios de pendiente de las curvas son semejantes (**Figuras 20g-h**).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (GB)

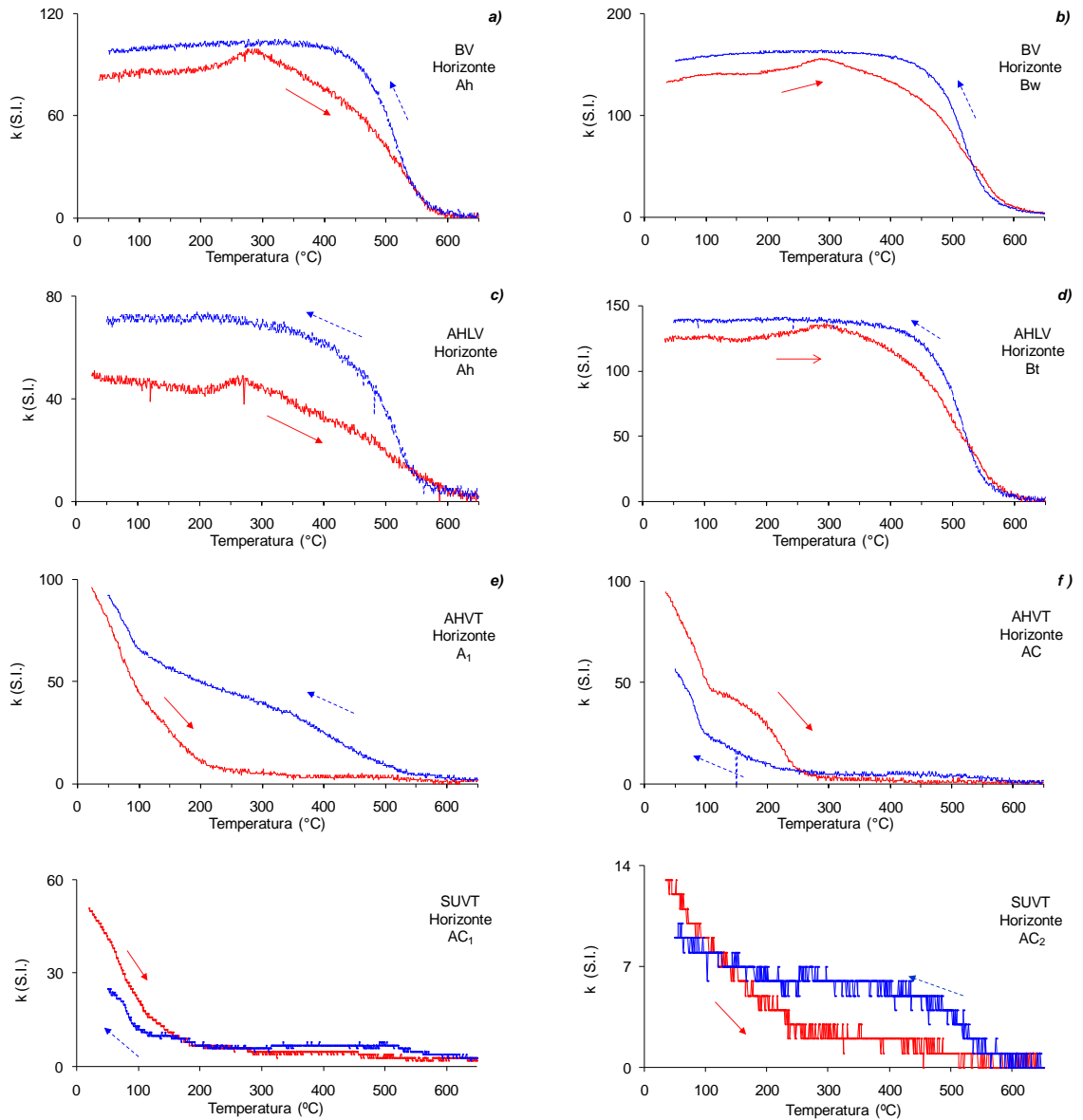


Figura 20.- Curvas k vs T representativas de los perfiles pedológicos estudiados en la región 2, el Glacis de Buenavista (GB). La figura está compuesta por gráficas con las tendencias representativas de los experimentos. La curva en color rojo (flecha continua, a la derecha) indica el proceso de calentamiento, mientras que la curva en color azul (flecha discontinua, a la izquierda) señala la etapa de enfriamiento de la muestra analizada. El perfil BV es un Andosol localizado en la superior del Glacis cerca de Buenavista. El perfil AHLV es un Luvisol ubicado aproximadamente en la parte media del glacis en Ahuetenco, mientras que los perfiles AHVT cerca de Ahuetenco y SUVT en Santa Úrsula Noria, son Vertisoles. Las variaciones en las pendientes de las curvas son asociados con cambios en la temperatura crítica (T_c , T_N , p.ej., $580^{\circ}\text{C}\sim\text{Mgt}$) de minerales magnéticos que se utilizan para inferir la composición de las partículas magnéticas del suelo.

5.2.2 Curvas de adquisición de IRM y ciclos de histéresis

Por otro lado, las curvas de adquisición de IRM son muy similares a lo largo de cada suelo, en su mayoría se saturan a campos inferiores a 400 mT, y llegan a registrar un suave aumento (2%) a campos que oscilan entre 100 y 300 mT (**Figuras 21 a-d**). De manera general y análogamente a las curvas k vs T , los suelos también se pueden separar en dos grupos: 1) el Andosol (BV) y Luvisol (AHLV) con remanencias más homogéneas relativamente (**Figuras 21a, b**), y 2) los Vertisoles (AHVT y SUVT) con un registro mejor diferenciado (**Figuras 21c, d**). En el primer grupo (BV y AHLV), el decremento en la remanencia es *inverso* siendo ésta ligeramente más alta en los horizontes profundos, con respecto a los horizontes más superficiales, que tienden a registrar valores más altos. El perfil AHLV muestra una relativa mayor variabilidad con respecto a las que se observan en el Andosol, aunque continua registrándose las mayores remanencias dentro del horizonte profundo (**Figura 21b**). Por el contrario, en el segundo grupo (Vertisoles) se puede observar una evidente y homogénea pérdida de remanencia dentro de cada suelo con aumento ligero (2%) alrededor de 200 mT (**Figuras 21c,d**). Las curvas se saturan a campos mayores de 300 mT y requieren de un mayor campo aplicado para ello, en los horizontes superficiales.

Los ciclos de histéresis son homogéneos dentro de cada perfil con algunas ligeras variaciones entre los suelos (**Figuras 21e-h**). En el caso del Andosol y el Luvisol, éstos muestran magnetizaciones relativamente similares (**Figuras 21e, f**), siendo el perfil BV el que poseen gráficas con una mayor cuadratura relativa en campos bajos (100 mT), incluso de todos los suelos analizados en esta región (**Figura 21e**). Por el contrario, los perfiles AHVT y SUVT, ambos Vertisoles (**Figuras 21g, h**), muestran curvas similares entre sí, con ciclos más constreñidos y donde las magnetizaciones tienden a ser mayores para SUVT.

5.2.3 Perfiles magnéticos BV (Andosol, Buenavista)

Las gráficas de los parámetros magnéticos del suelo son similares y consistentes entre sí, y se caracterizan, en general, por su tendencia a incrementarse gradualmente, con pocas y suaves variaciones (**Figuras 22a-p**). Los perfiles de concentración presentan suaves y relativas diferencias entre ellos, en especial en la parte superficial en la mayoría de las curvas (**Figuras 22a-f**). En los gráficos de χ , ARM y $SIRM_{1T}$ existe una disminución dentro del horizonte Ah, con los valores más

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (GB)

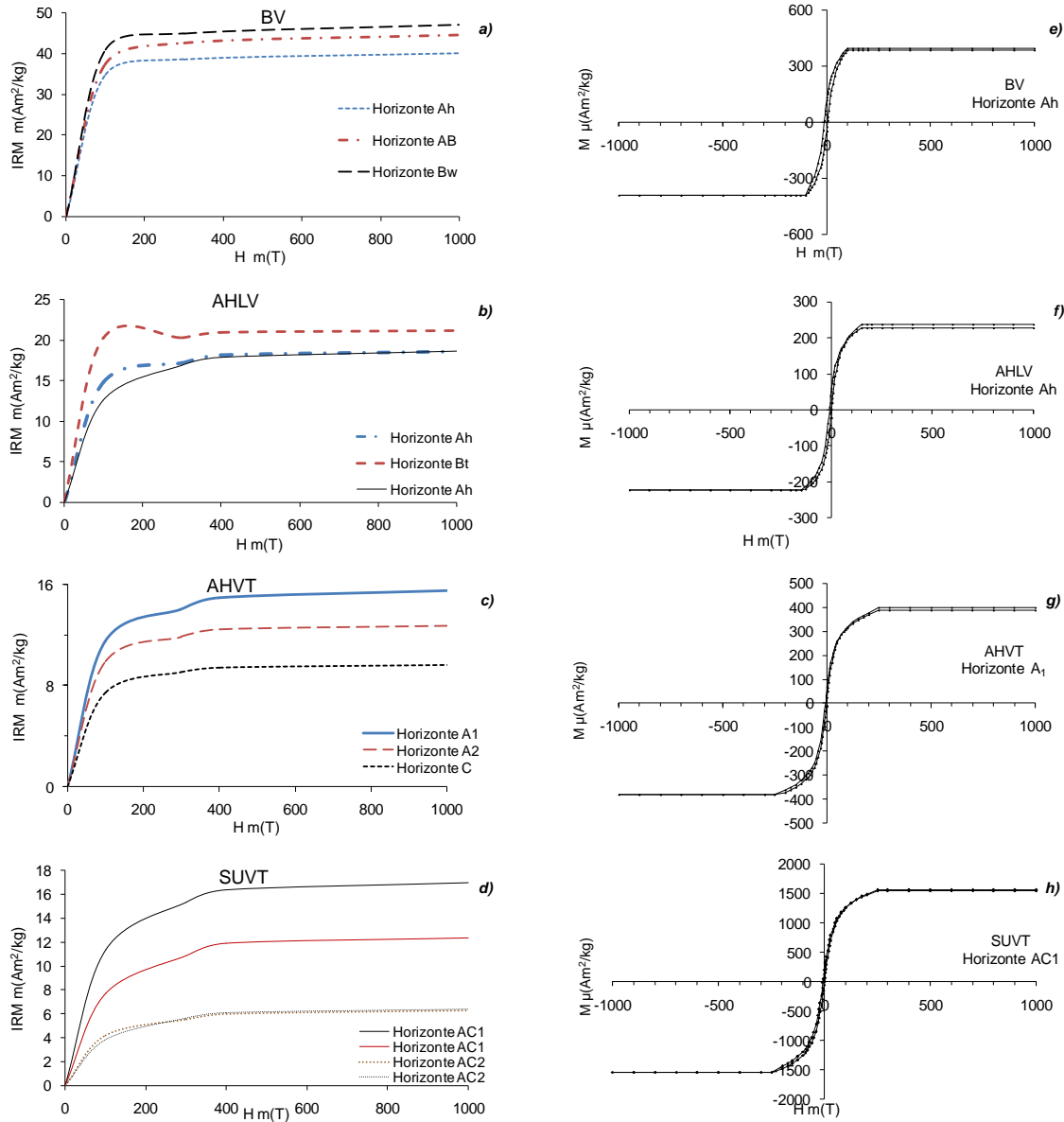


Figura 21.- Curvas representativas de adquisición de la magnetización isoterma remanente (IRM) y ciclos de histéresis de los suelos estudiados en el Glacis de Buenavista. La figura presenta las gráficas con tendencias representativas de: las curvas de IRM (a-d) con una pendiente suave son asociadas con una mayor coercitividad, curvas que no se saturan son asociados minerales tipo goethita, Gth y hematita, Hmt, mientras que minerales con pendiente abrupta y que saturan a campos menores a 300mT son interpretados como un registro de minerales magnéticamente suaves. Los ciclos (e-f) abiertos son asociados con minerales magnéticamente duros (Hmt, p.ej.). La estabilidad y cuadratura de los ciclos son utilizadas para inferir información sobre la composición y dominio de las partículas magnéticas (Maher y Thompson, 1999; Dunlop, 2002 y 2006 p.ej.,).

altos en la parte superficial del suelo (**Figuras 22a, d,e**), mientras que en el resto de los parámetros ($\Delta\chi$, NRM y $SIRM_{IT}/\chi$) se observa una tendencia opuesta (**Figuras 22b,c, f**). En el resto del suelo los parámetros aumentan (horizontes AB y Bw), excepto en $SIRM_{IT}/\chi$ dentro del horizonte Bw ~ (hasta su región media), siendo los gráficos de ARM (**Figura 22d**) y $SIRM_{IT}$ (**Figura 22e**) los que registran una mayor variación. En el fondo del mismo horizonte, se observa un ligero decremento en las gráficas de los parámetros magnéticos, con excepción de NRM y $SIRM_{IT}/\chi$ respectivamente que se comportan de manera contraria (**Figuras 22c, f**).

Por otro lado, a diferencia de los parámetros descritos arriba, los perfiles asociados con los dominios magnéticos muestran una relativa mayor similitud entre sí (**Figuras 22g-j**). De manera generalizada, las gráficas tienen una suave tendencia a incrementarse gradualmente con pocos cambios, que son relativamente más frecuentes dentro del horizonte Bw. Las gráficas de $\chi_{fd\%}$ (**Figura 22g**) y χ_{ARM} (**Figura 22i**) poseen una mayor variación dentro de este subgrupo de parámetros magnéticos. Los parámetros ARM/IRM_{100} y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ muestran curvas similares entre sí, con pocos y suaves cambios ~ constante en Bw (**Figuras 22h, j**). En el horizonte Ap, las gráficas de todos los perfiles magnéticos decrecen hacia la parte baja del horizonte, con excepción de $\chi_{fd\%}$, que en la parte media registra un ligero repunte (**Figura 22g**), mientras que en AB, todos gráficos disminuyen ligeramente.

En cuanto a los parámetros de coercitividades ó dureza magnética muestran curvas con pocos y suaves cambios a lo largo del suelo para la mayor parte de estos (**Figuras 22k-p**), lo que permite separarlas en tres grupos de acuerdo con sus tendencias: 1) H_{CR} y L con una tendencia a incrementarse hacia el fondo del suelo, siendo el primero el parámetro que presenta mayor variabilidad (**Figuras 22k,n**), 2) HIRM (**Figuras 22l,m**) que poseen una ligera tendencia creciente hacia la parte inferior del suelo, hasta la parte superior del horizonte Bw, donde se registra una tendencia decreciente hasta el fondo del suelo, y 3) Los cocientes S, que tienen un comportamiento opuesto al que se registra en las curvas de HIRM, incrementándose a partir de la región media del horizonte Bw hasta la parte baja del perfil (**Figuras 22o,p**)

5.2.4 Perfiles magnéticos de AHLV

(Luvisol, Ahuatenco)

Los gráficos de los parámetros magnéticos de este suelo son semejantes entre sí, y se caracterizan por tener pocas y suaves variaciones en la mayor parte de estos (**Figuras 23a-p**), donde sobre sale el cambio abrupto que se registra en la parte baja del horizonte Bt.

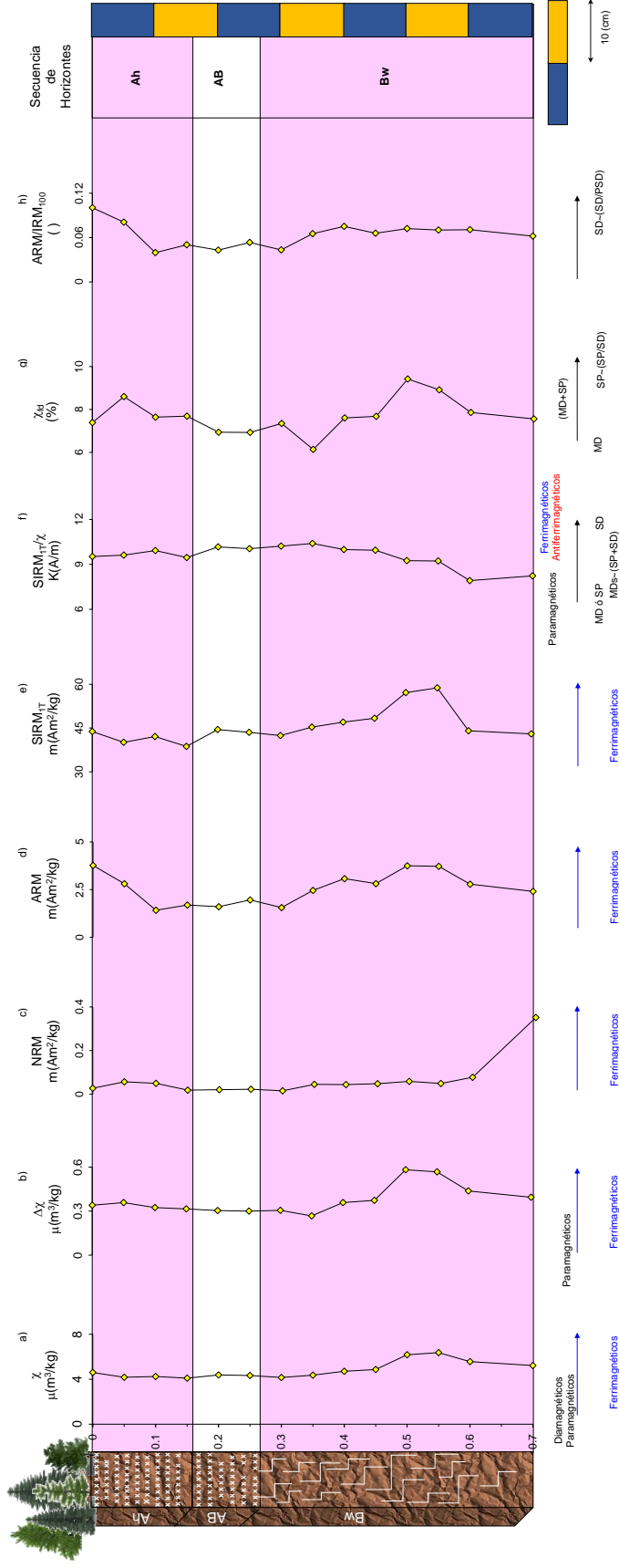


Figura 22.- Gráficas de los *perfiles magnéticos* analizados en **BV**. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad de Buenavista, dentro de la región 2 en el Glacis de Buenavista (GB). Este suelo se ha clasificado como un Andosol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/ó la fotografía del mismo (Figura 22.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f*), el tamaño de dominio (perfiles f-g), así como el espectro de coercitividades ó *dureza* (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil SIRM_T/χ (f*) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración/dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgt. p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Gh/Hmt. p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros. ver *Apéndice*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (GB)

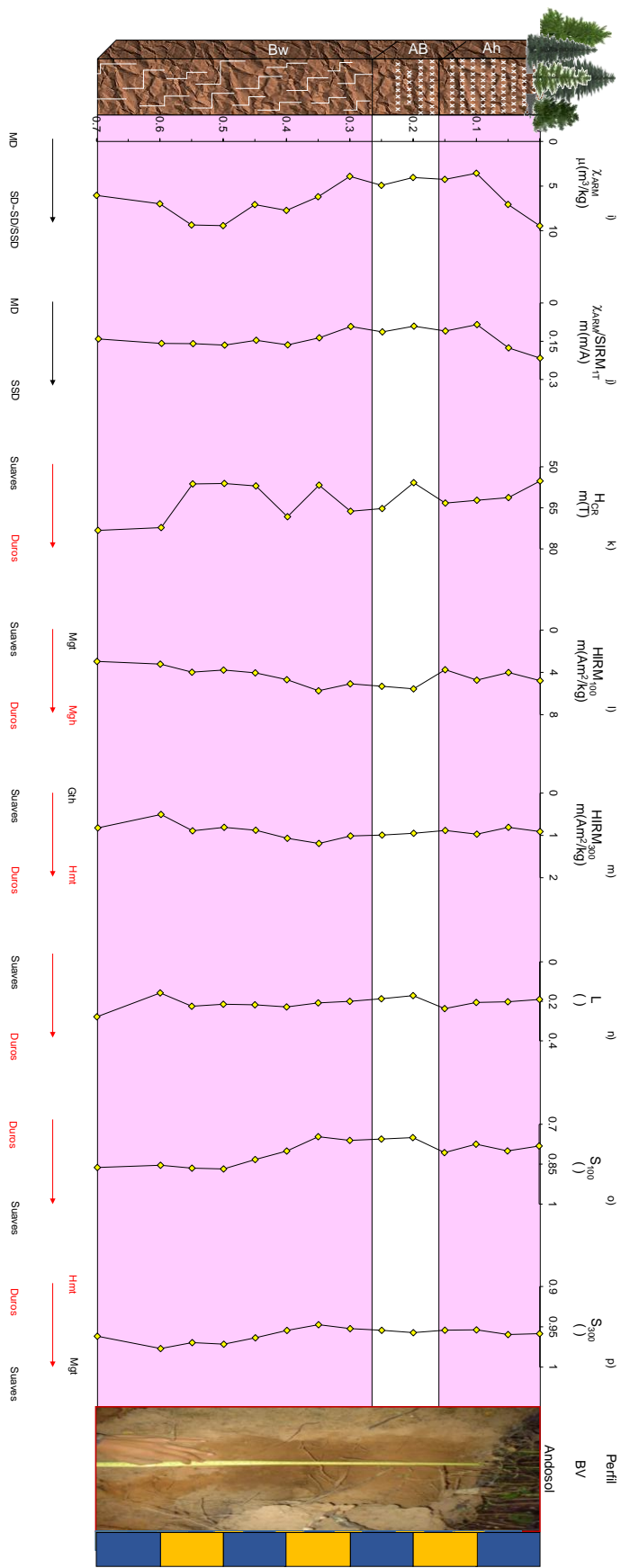


Figura 22 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en BV.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los perfiles magnéticos de concentración registran de manera general, una tendencia a incrementarse hacia la parte inferior del suelo, con un ligero decremento en la transición entre los horizontes Ah/Bt (**Figuras 23a-f**). Las gráficas de χ (**Figura 23a**), SIRM_{1T} (**Figura 23e**) y SIRM_{1T}/χ (**Figura 23f**) tienen el mismo comportamiento casi constante en la parte superficial del horizonte Ah, mientras que en la parte media la curva de NRM (**Figura 23 c**) registra un cambio abrupto. En el horizonte Bt, excepto por NRM (que se incrementa hacia el fondo del suelo), el resto de los perfiles solo lo hace hasta la región media, decreciendo posteriormente. Las curvas de $\Delta\chi$ y ARM presentan una relativa mayor variabilidad con respecto al resto de éstos parámetros magnéticos (**Figuras 23b, d**).

Con respecto a los perfiles magnéticos relacionados con los dominios magnéticos, éstos reflejan una mayor similitud entre sí, comparado con respecto a los gráficos de los parámetros descritos anteriormente (**Figuras 23g-j**). Estos poseen, con excepción de $\chi_{fd\%}$ y $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}_{1T}$ (parcialmente), pocas y suaves variaciones, con una tendencia creciente dentro de los horizontes Ah (**Figuras 23g, j**). Posteriormente, de forma generalizada, los perfiles tienden a decrecer, observándose comportamientos opuestos entre $\chi_{fd\%}$ y $\text{ARM}/\text{IRM}_{100}$ (**Figuras 23g, h**) así como χ_{ARM} y $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}_{1T}$ (**Figuras 23i,j**) respectivamente.

Los parámetros de coercitividad ó dureza muestran comportamientos relativamente semejantes, con pocas y suaves variaciones, que permiten separar y agruparlos en tres tipos de tendencias: 1) H_{CR} (**Figura 23k**) decrece desde la parte media del horizonte Ah hasta la parte superior del Bt, y posteriormente aumenta hacia el fondo del suelo, 2) HIRM y L muestran curvas con tendencias crecientes a lo largo del perfil (**Figuras 23l-n**), siendo HIRM_{300} el parámetro que registra cambios más frecuentes (**Figura 23m**). El tercer grupo lo integran los cocientes S (**Figuras 23o, p**) que tienen un comportamiento opuesto al que se observa en L.

5.2.5 Perfiles magnéticos AHVT

(Vertisol, AhuAtenco)

A diferencia de los perfiles previamente descritos, los gráficos de este suelo muestran pocas y suaves cambios dentro de sus curvas (**Figuras 24a-p**), con una clara tendencia decreciente, excepto por NRM (**Figura 24c**) y $\chi_{fd\%}$ (**Figura 24g**) que muestran una mayor variabilidad, así como por tener las tendencias relativamente crecientes en los cocientes S (**Figuras 24o, p**) respectivamente. De acuerdo con los parámetros de concentración (**Figuras 24a-f**), con excepción

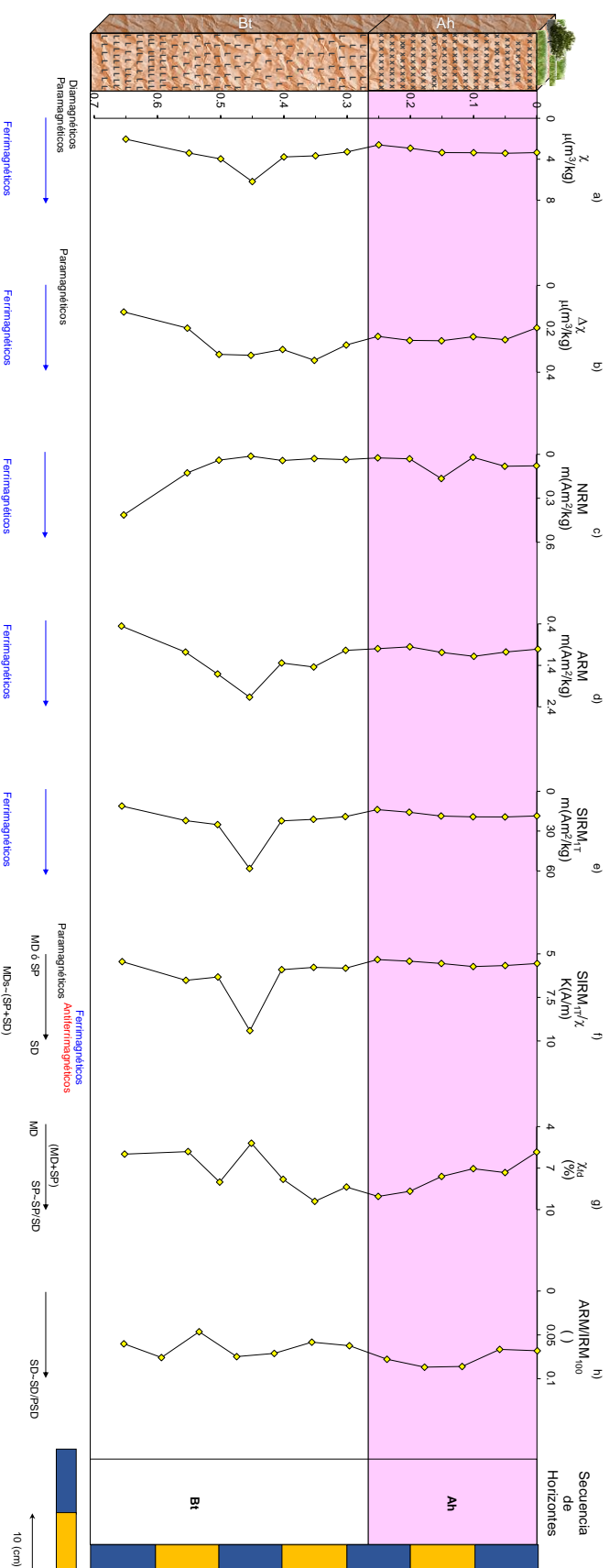


Figura 23.- Gráficas de los *perfiles magnéticos* analizados en **AHLV**. La figura contiene la relación (Variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad de Ahuatenco, dentro de la región 2 en el Glacis de Buenavista (GB). Este suelo se ha clasificado como un Luvisol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/o la fotografía del mismo (Figura 23.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f^o), el tamaño de dominio (perfiles f^o-j), así como el espectro de coercitividad o dureza (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil SIRM_{tr} χ (f^o) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración/dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Gth/Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros, ver Apéndice).

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (GB)

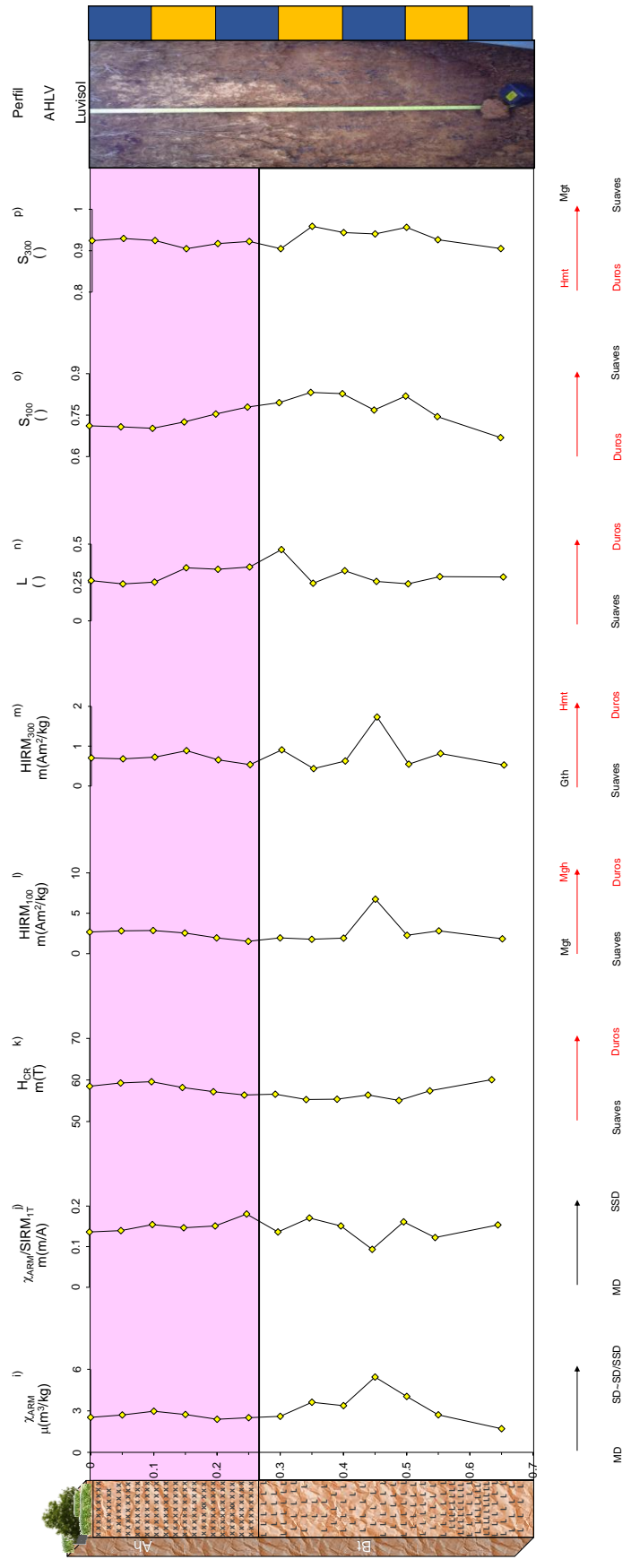


Figura 23 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en AHLV

de χ (**Figura 24a**) el resto de los perfiles muestra un suave aumento en la parte superficial del horizonte A₁ decreciendo posteriormente. En el horizonte A₂ las curvas de los parámetros χ , $\Delta\chi$ y NRM aumentan en la parte superior (**Figuras 24a-c**) mientras que en el resto de los gráficos, éstos disminuyen, registrando hacia la parte baja del suelo un ligero repunte (**Figuras 24d-f**). La tendencia decreciente se conserva a lo largo del horizonte AC para todos los perfiles magnéticos.

Por otro lado con respecto a los parámetros relacionados con los dominios magnéticos presentan curvas con pocas variaciones (**Figuras 24g-j**). Las gráficas de ARM/IRM₁₀₀ (**Figura 24h**) y $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}_{1\text{T}}$ (**Figura 24j**) muestran curvas semejantes, con una tendencia ~ constantes, mientras que $\chi_{\text{fd}\%}$ (**Figura 24g**) y χ_{ARM} (**Figura 24i**) tienen curvas con una mayor variabilidad relativa, registrándose en el primer parámetro los cambio más abruptos.

En el caso de los parámetros de coercitividades, la mayoría de sus gráficas presenta pocas variaciones, con una tendencia decreciente en la mayor parte de éstas, con cambios graduales en sus perfiles (**Figuras 24k-p**). Excepto por los cocientes S (**Figuras 24o, p**), los demás parámetros decrecen a lo largo del horizonte A₁. En el horizonte A₂, la tendencia decreciente solo se preserva en los gráficos de H_{CR} y HIRM (**Figuras 24k-m**), En el resto de éstos, la tendencia es opuesta (**Figuras 24n-p**), siendo más semejantes las curvas de L y S₃₀₀ ~ constantes (**Figuras 24n, p**), resaltando el aumento abrupto en la parte superior para S₁₀₀ (**Figura 24o**).

5.2.6 Perfiles magnéticos SUVT

(Vertisol, Santa Úrsula Noria)

Al igual que en el perfil previo, los parámetros magnéticos de este suelo tienen una estrecha similitud entre ellos y a su vez con AHVT, caracterizándose de manera generalizada por mostrar pocos y suaves variaciones, así como por su tendencia decreciente, registrando los valores más altos hacia la parte superficial del suelo (**Figuras 25a-p**).

Los perfiles magnéticos de concentración (**Figuras 25a-f**) muestran ligeras diferencia que permiten separar a los gráficos de acuerdo a sus tendencias en tres grupos: 1) χ (**Figura 25a**), ARM (**Figura 25d**) y SIRM_{1T} (**Figura 25e**) que decrecen a lo largo del horizonte AC₁, con un cambio relativamente abrupto en la transición entre horizontes (AC₁/AC₂), siendo posteriormente las curvas más homogéneas. El segundo grupo lo integran los perfiles magnéticos de $\Delta\chi$ y NRM cuyos gráficos tienen un cambio abrupto en la parte superficial de AC₁, así como una mayor variabilidad relativa en la parte baja del suelo (**Figuras 25b,c**).

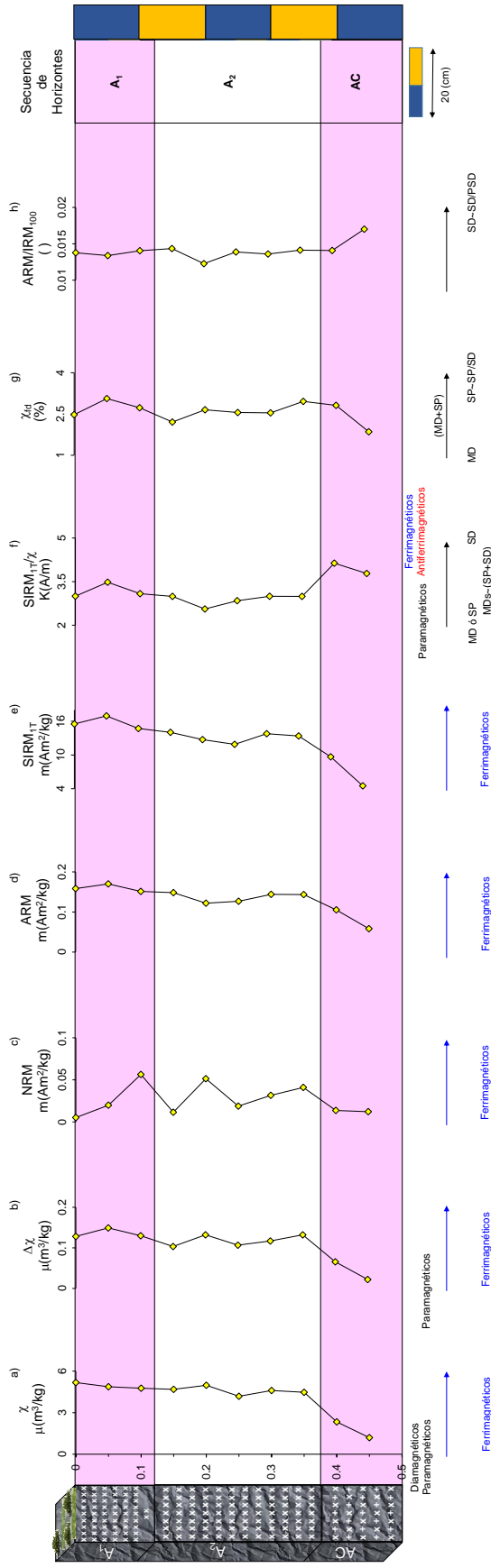


Figura 24.- Gráficas de los *perfiles magnéticos* analizados en AHVT. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad de Ahuatenco, dentro de la región 2 en el Glacis de Buenavista (GB). Este suelo se ha clasificado como un Vertisol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/o la fotografía del mismo (Figura 2.4.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f-), el tamaño de dominio (perfiles f-), así como el espectro de coercitividades ó *dureza* (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil $SIRM_{100}/\chi$ (f°) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración/dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Gth/Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros. ver Apéndice).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas en Secuencias Volcánicas como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (GB)

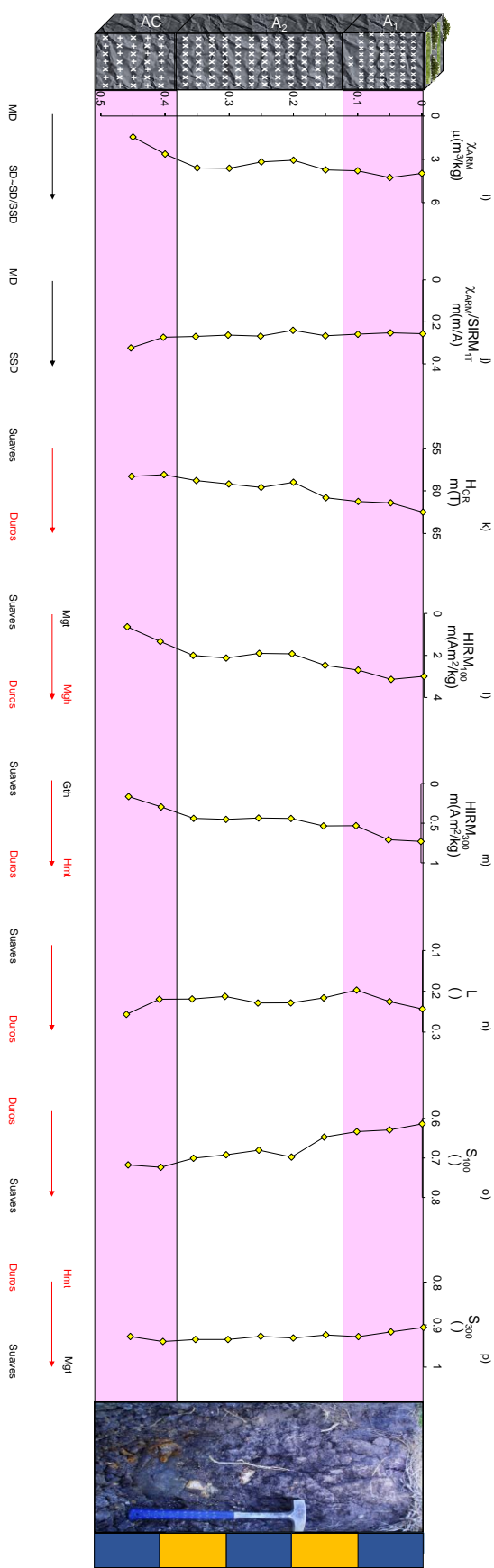


Figura 24 (Continuación). - Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en AHVT.

Resaltan, en general, los comportamientos opuestos entre sí que se observan a lo largo de todo el perfil. La curva de $SIRM_{1T}/\chi$ (**Figura 25f**) compone el último grupo, con una tendencia a incrementarse gradualmente con suaves cambios en todo el suelo.

Los parámetros de dominio magnéticos (**Figuras 25g-j**) muestran curvas con pocas variaciones, excepto en el perfil $\chi_{fd\%}$ (**Figura 25g**) que tiene cambios más abruptos y frecuentes con respecto al resto de los parámetros magnéticos. En la parte superficial del horizonte AC_1 , los gráficos presentan un ligero aumento hacia la parte baja del horizonte con excepción de χ_{ARM} (**Figura 25i**). Se puede observar un relativo cambio ligero en la transición entre horizontes y una tendencia decreciente dentro del horizonte AC_2 (superior) en ARM/IRM_{100} , χ_{ARM} y $\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$, incrementándose éstos hacia el fondo a partir de la región media de AC_2 (**Figuras 25h-j**). En el caso de $\chi_{fd\%}$, se observa un comportamiento relativamente opuesto a los previamente descritos para el resto de los parámetros magnéticos dentro del horizonte AC_2 (**Figura 25g**).

Por otro lado, en el caso de los parámetros de coercitividades (**Figuras 25k-p**) muestran curvas con pocas y suaves variaciones en sus curvas. Los perfiles magnéticos de H_{CR} y $HIRM_{300}$ son opuestas entre sí (**Figuras 25k, m**) incrementándose la primera dentro del horizonte AC_1 , con los valores más bajos en la parte superficial, y decreciendo posteriormente a partir de la región media del horizonte AC_2 . $HIRM_{100}$ muestra una estrecha similitud con $HIRM_{300}$, aunque las variaciones en éste último se encuentran mejor definidas (**Figuras 25l, m**) y a su vez ambas gráficas son semejantes al perfil S_{100} (**Figura 25o**). Los cocientes S poseen curvas parecidas entre sí (**Figuras 25o-p**), mientras que L tiene una gráfica homogénea, con pocas y suaves variaciones (**Figura 25n**), registrando un comportamiento contrario al que se encuentra en S_{300} (**Figura 25p**).

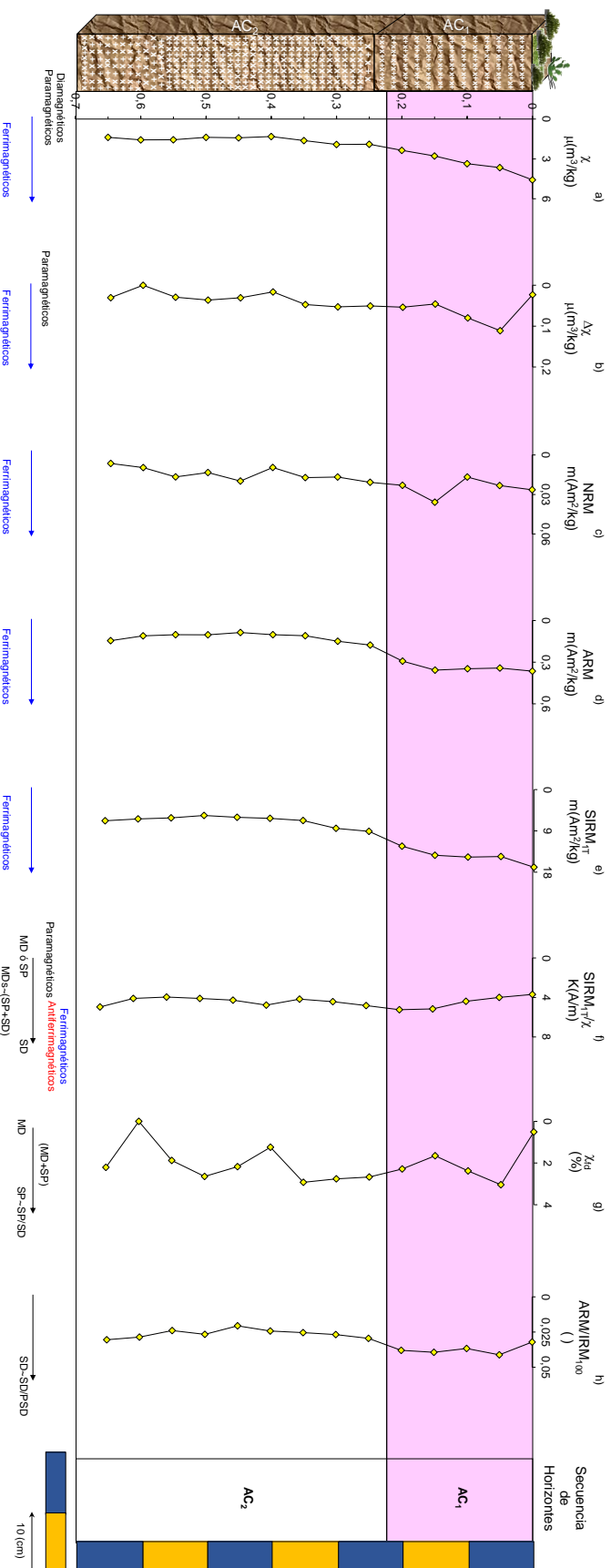


Figura 25.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en SUVT. La figura contiene la relación (Variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (0 que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra de la localidad de Santa Úrsula, dentro de la región 2 en el Glacis de Buenavista (GB). Este suelo se ha clasificado como un Vertisol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/ó la fotografía del mismo (Figura 25.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f), el tamaño de dominio (perfiles f-g), así como el espectro de coercitvidades ó dureza (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil SIRM_{17}/χ (f) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración/dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitvidad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitvidad (Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitvidad (Gth/Hnt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros, ver Apéndice).

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (GB)

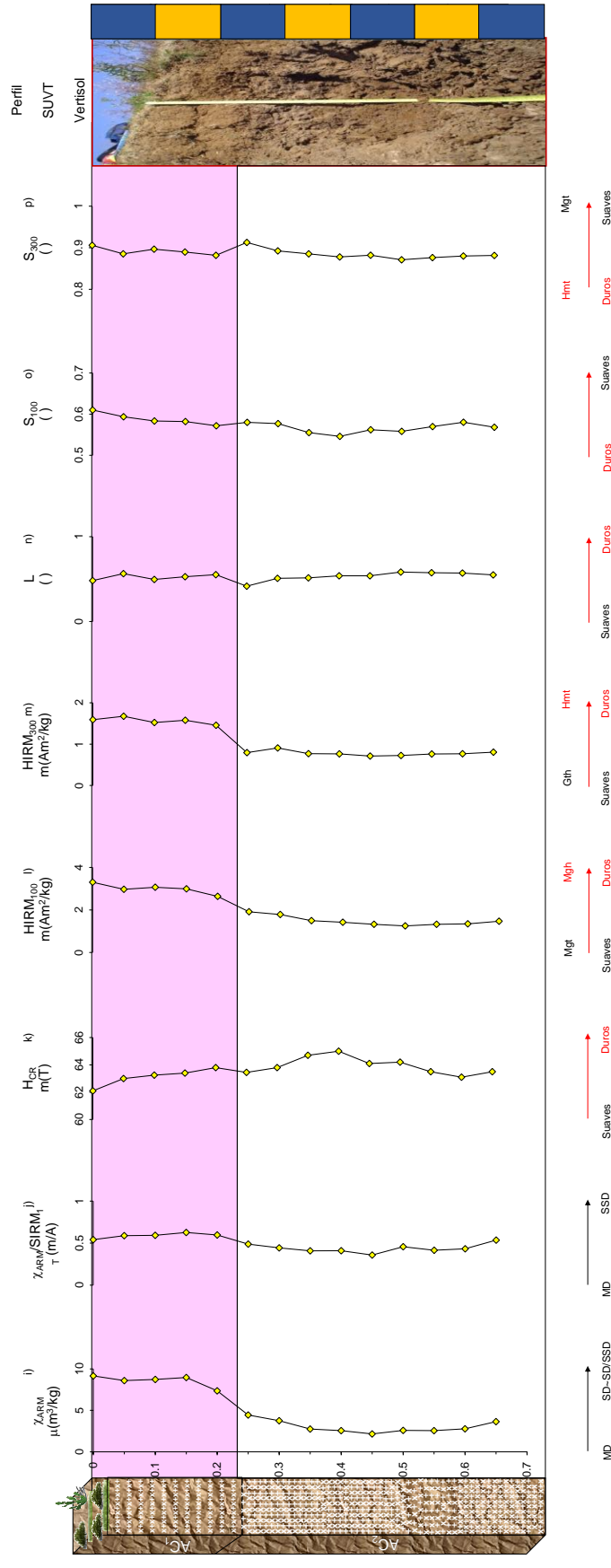


Figura 25 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en SUVT.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (GB)

Tabla 9. - Valores registrados en algunos de los parámetros magnéticos de los suelos del Glacis de Buenavista

Parámetros magnéticos	BV (Ah ₁ -AB-Bw)	ALHV (Ah-Bt)	AHVT (A ₁ -A ₂ -AC)	SUVT (AC ₁ -AC ₂)
χ $\mu(\text{m}^3/\text{kg})$	6,36	6,18	5,17	6,21
	4,09	2,04	1,19	1,31
	4,80	3,48	4,12	2,55
SIRM _{1T} m(Am ² /kg)	58,75	58,20	16,94	44,20
	38,69	11,12	4,51	5,64
	45,62	21,89	12,71	12,38
χ_{fd} (%)	9,42	9,40	3,05	21,58
	6,13	5,20	1,85	0
	7,69	7,39	2,58	3,21
ARM/IRM ₁₀₀ (-)	0,100	8,68E-02	1,70E-02	0,041
	0,039	0,046	0,012	0,024
	0,0637	0,068	0,0140	0,030
χ_{ARM} $\mu(\text{m}^3/\text{kg})$	9,46	5,44	4,27	9,16
	3,56	1,71	1,46	2,56
	6,42	3,023	3,33	6,25
H _{CR} m(T)	73,25	60,1	62,5	65
	55,2	55,1	58,1	58,7
	62,07	57,34	59,89	63,11
S ₁₀₀ (-)	0,86	0,12	0,72	0,70
	0,74	4,01	0,61	0,54
	0,80	0,75	0,67	0,58

La tabla contiene los valores obtenidos para una selección de los parámetros magnéticos analizados en los suelos de la región 2, (GB). De Izquierda a derecha, la primera columna corresponde con los parámetros magnéticos, de la segunda a la quinta columna corresponden a los valores obtenidos para cada perfil, mostrándose la secuencia de horizontes que componen a cada perfil. Los parámetros χ y SIRM_{1T} son utilizados como un registro de la concentración de las partículas magnéticas, mientras que $\chi_{fd\%}$, ARM/IRM₁₀₀ y χ_{ARM} con un registro del dominio magnético. Los parámetros H_{CR} y S₁₀₀ son un registro de la dureza y/o coercitividad de los granos magnéticos. Cada tercia de datos corresponde, de arriba hacia abajo, con los valores máximos, mínimos y promedio respectivamente para cada parámetro dentro de cada suelo. El perfil BV es un Andosol, AHLV corresponde a un Luvisol, mientras que AHVT y SUVT son Vertisoles, respectivamente.

5.3 Volcán Nevado de Toluca

5.3.1 Curvas k vs T

De acuerdo con las gráficas k vs T, los perfiles analizados en esta región presentan curvas similares entre sí (**Figuras 26 a-j**). En general, éstas se caracterizan por registrar en su mayoría suaves y graduales cambios en sus pendientes, un grado de reversibilidad de moderado a alto, así como una pérdida de k, durante el proceso de enfriamiento. Sin embargo, existen sutiles diferencias que permiten identificar en general dos tipos de curvas diferentes: a) CR e IGF2N (**Figuras 26 a,b, e,f**) y b) IGF2D (**Figura 26i,j**), mientras que el resto de los suelos (IGF1N e IGF1D) integran un subgrupo que en que se mezclan los comportamientos de los otros dos grupos.

El primer grupo se caracteriza en general, por tener una pérdida de k, un mayor grado de irreversibilidad en la parte baja de los perfiles con respecto a la parte superficial, con una clara tendencia creciente desde el inicio del calentamiento, cambios de pendiente alrededor de los 350, 500 y 580°C aproximadamente (**Figuras 26 b, f**). En el intervalo de 300-500°C, las curvas decrecen suavemente y registran un cambio abrupto alrededor de los 350°C, siendo el perfil IGF2N, donde son más evidentes los cambios (**Figura 26f**). Por el contrario, los horizontes superficiales tienen curvas más reversibles, con diferencias entre sí (**Figuras 26 a, e**). En el caso de CR, la curva tiene valores más altos de k con respecto a lo que se observa en IGF2N (**Figura 26a**). A diferencia de IGF2N (**Figura 26e**), durante el enfriamiento en CR (superficial) hay una pérdida de k, mientras que en IGF2N se muestra un incremento. No obstante, en ambos suelos las tendencias de las curvas son similares, registrando los cambios de pendientes alrededor de 120, 300, 400, 550 y 625°C durante el proceso de calentamiento.

El segundo grupo, IGF2D se distingue por mostrar el mayor grado de reversibilidad de los suelos estudiados en esta región, registrando una tendencia creciente desde el inicio del calentamiento (más evidente en la parte baja del suelo), así como una disminución homogénea de k durante el enfriamiento (**Figuras 26i,j**). Los cambios en las curvas se registran alrededor de los 50-100°C, 200, 350, 450 y 580°C.

El resto de los perfiles (IGF1N e IGF1D) describen curvas que mezclan tendencias de los grupos previamente descritos, aunque con un grado de irreversibilidad moderada, y en su mayoría con una disminución de k durante el enfriamiento (**Figuras 26c, d y Figuras 26g, h**).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VNT)

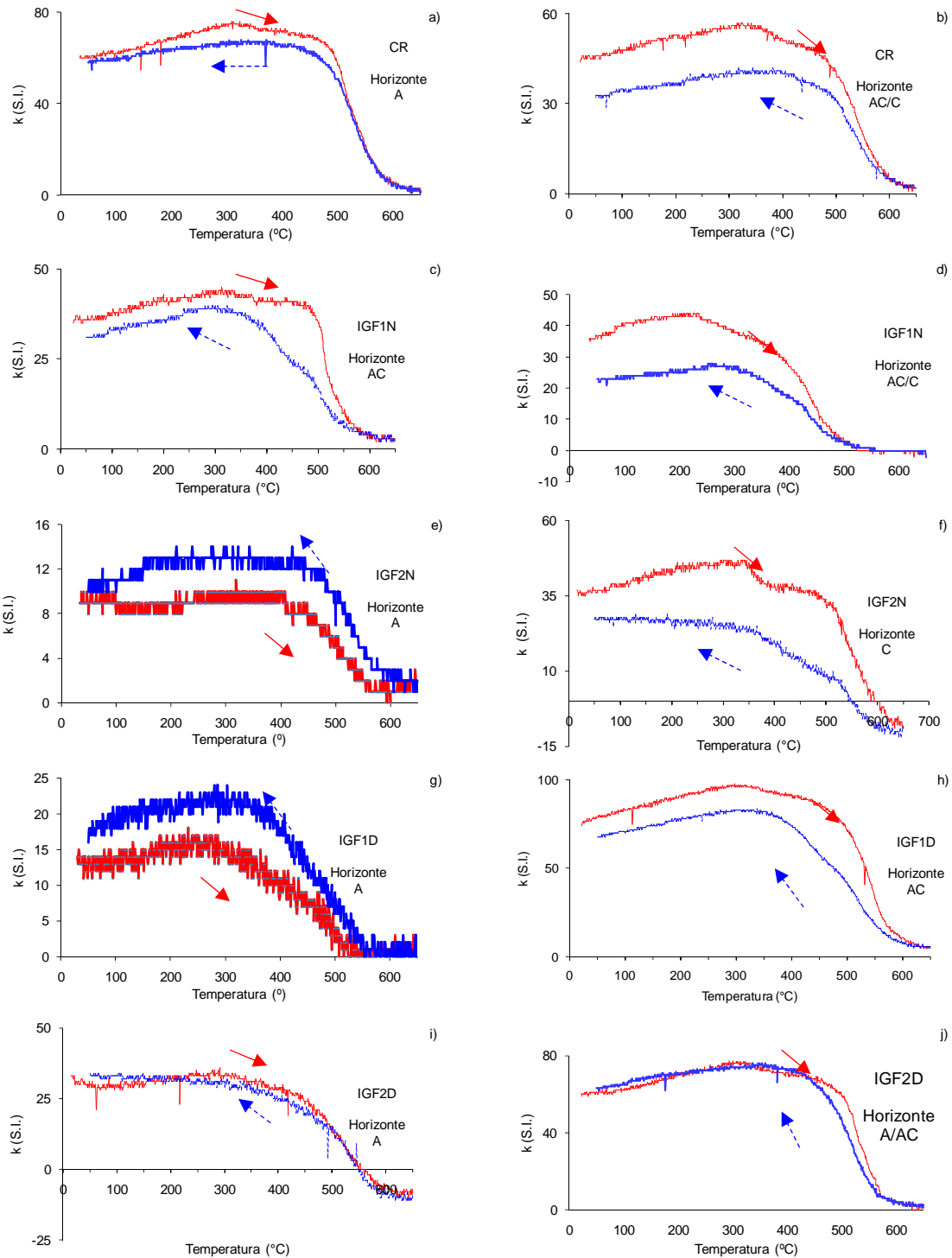


Figura 26.- Curvas k vs T representativas de los perfiles pedológicos estudiados en la región 3, el volcán Nevado de Toluca (VNT). La figura está compuesta por gráficas con las tendencias representativas de los experimentos. La curva en color rojo (flecha continua, a la derecha) indica el proceso de calentamiento, mientras que la curva en color azul (flecha discontinua, a la izquierda) señala la etapa de enfriamiento de la muestra analizada. Los perfiles pedológicos estudiados en ésta región se han asociado con etapas incipientes como Regosol. Los cambios en las pendientes de las curvas son asociados con cambios en la temperatura crítica (T_C , T_N , p.ej., $580^\circ\text{C}\sim\text{Mg}$) de minerales magnéticos, que se utilizan para inferir la composición de las partículas magnéticas del suelo.

Las curvas de IGF1N (**Figura 26d**) e IGF1D (**Figura 26g**) registran los cambios de pendiente durante el calentamiento a temperatura de 80, 220-250, 450-480, y 550°C. Una diferencia notable entre ambas curvas es su comportamiento opuesto. Es decir, durante la etapa de enfriamiento IGF1N presenta un decremento en k , mientras que IGF1D tiene un aumento. Por el contrario, en el horizonte AC de ambos perfiles (IGF1N e IGF1D) las curvas son análogas, con tendencias crecientes desde el inicio del calentamiento, una relativa menor irreversibilidad, así como una disminución de k durante el proceso de enfriamiento (**Figuras 26c, h**). Los cambios en las curvas de calentamiento ocurren alrededor de 300-350, 500, 580 y 625°C aproximadamente.

5.3.2 Curvas de adquisición de IRM y ciclos de histéresis

Con respecto a las curvas de magnetización isothermal remanente (IRM), éstas se pueden separar en tres grupos principales de acuerdo con el tipo de adquisición que presentan (**Figura 27a-e**). En el primero se encuentra el perfil CR con curvas cuyas pendientes son relativamente abruptas, que pre-saturan a campos bajos (~100 mT), y después tienden a incrementarse hasta el final de la adquisición sin alcanzar a saturarse (**Figura 27a**). Algunas de las muestras tienen un cambio abrupto posterior a su pre-saturación (p.ej., horizonte Ap), sin que llegue a saturarse la muestra con el campo máximo aplicado. El segundo grupo de curvas los componen las gráficas asociadas con los perfiles IGF (1N y 2N) que presentan comportamientos similares entre sí (**Figuras 27b-c**). Con respecto a CR, estos gráficos muestran pendientes más suaves, y en general tienden a saturarse en campos altos (~ $H > 400$ mT), cuando llegan a hacerlo. Sin embargo, también pueden observarse curvas (IGF2N, p.ej.) que presentan una pre-saturación a campos bajos (**Figura 27c**). El tercer grupo lo conforman el resto de los suelos (IGF1D e IGF2D), con curvas parecidas entre sí, y con pendientes relativamente más suaves (**Figuras 27d-e**). La mayoría de éstas se saturan a campos altos (~ 400-500 mT) aproximadamente (**Figura 27d**), registrándose una pendiente abrupta en campos bajos ($50\text{mT} < H$), con cambios suaves de pendiente, como ocurre en la parte superficial del perfil IGF2D (**Figura 27e**).

En relación con los ciclos de histéresis (**Figuras 27g-j**), estos describen curvas similares entre sí, y se caracterizan, en su mayoría, por ser relativamente abiertos (mayor estabilidad), aunque tienden a saturarse a campos bajos ($H \sim < 250$ mT). Sin embargo, también existen muestras que tienden a mostrar un ligero y “pseudo” comportamiento constreñido (*forma de avispa*) en los extremos, como el que se observa para el perfil CR (**Figura 27f**).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VNT)

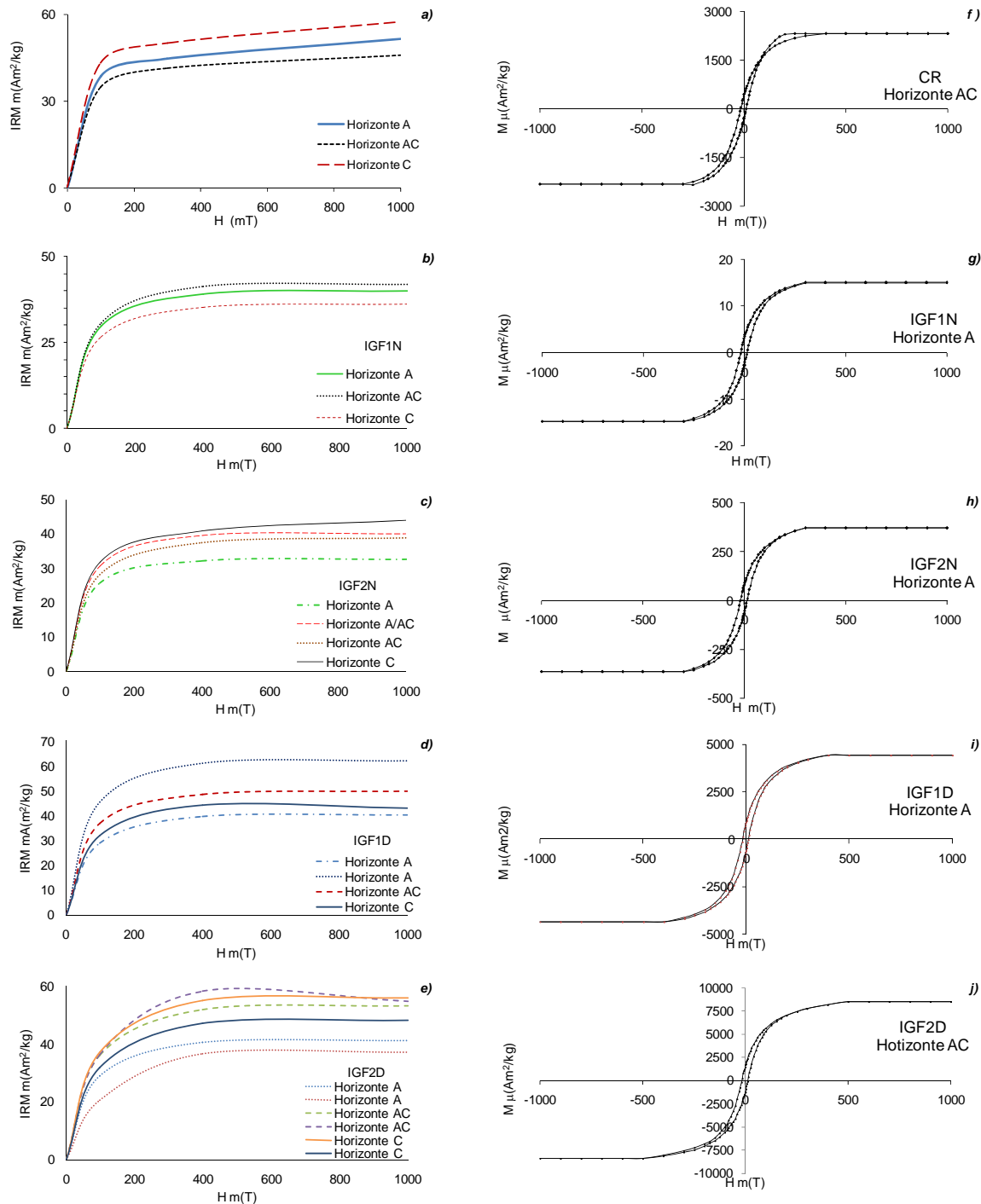


Figura 27.- Curvas de adquisición de la magnetización isoterma remanente (IRM) y ciclos de histéresis de suelos estudiados en el volcán Nevado de. La figura presenta las gráficas con tendencias representativas de: las curvas de IRM (a-e) con una pendiente suave son asociadas con una mayor coercitividad, curvas que no se saturan son asociados minerales tipo goethita (Gth) y hematita (Hmt), mientras que minerales con pendiente abrupta y que saturan a campos menores a 300mT son interpretados como un registro de minerales magnéticamente suaves. Los ciclos (f-j) abiertos son asociados con minerales magnéticamente duros (Hmt, p.ej.). La estabilidad y cuadratura de los ciclos son utilizadas para inferir información sobre la composición y dominio de las partículas magnéticas (Maher y Thompson, 1999; Dunlop, 2002 y 2006 p.ej.,).

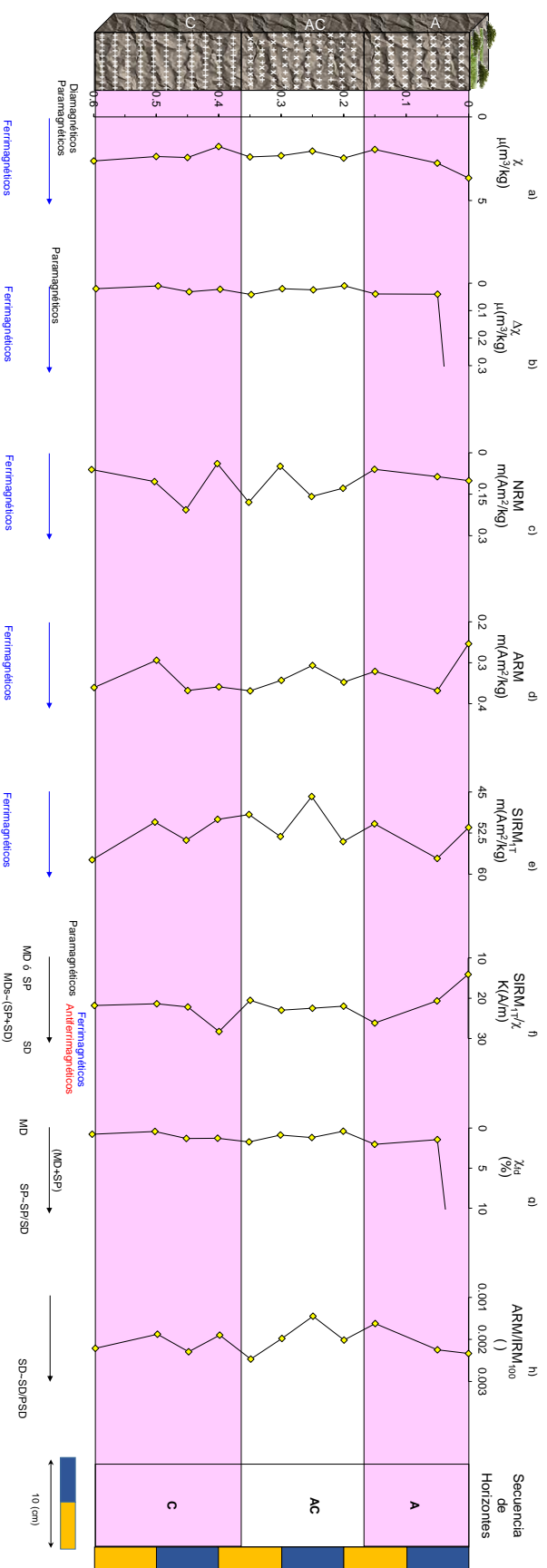
5.3.3 Perfiles magnéticos de CR

(Regosol, Nevado de Toluca, Cráter)

Los gráficos de los parámetros magnéticos de este suelo son relativamente semejantes entre sí, y se caracterizan de manera general, por sus frecuentes variaciones a lo largo del perfil (**Figuras 28a-p**).

En el caso de los parámetros de concentración, se observa que la gráfica de χ (**Figura 28a**) presenta un comportamiento relativamente opuesto al que describe la curva de $\Delta\chi$ (**Figura 28b**). Es decir, en el primer parámetro existe una tendencia decreciente dentro del horizonte A, con un ligero repunte en la transición con el horizonte AC, registrándose una mayor variabilidad en el resto de los horizontes (**Figura 28a**). En ambos horizontes, éste parámetro muestra una tendencia creciente, con un decremento en la transición entre los horizontes ($\sim AC/C$). En el caso de $\Delta\chi$, la gráfica muestra una curva relativamente más homogénea con suaves variaciones, resaltando el aumento en la parte superficial del horizonte A. Los perfiles de NRM (**Figuras 28c**), ARM (**Figura 28d**) y $SIRM_{IT}$ (**Figura 28e**) tienen gráficos cuyos comportamientos son similares entre sí, caracterizándose éstos por sus frecuentes e intensos cambios que se presentan especialmente dentro del horizonte AC. En el horizonte A, NRM decrece, observándose que los valores más altos se ubican en la parte superior, con un cambio abrupto en la transición entre los horizontes A y AC (**Figura 28c**). Los perfiles magnéticos de ARM y $SIRM_{IT}$ son similares entre sí en el horizonte A (tendencia opuesta a la de NRM), aunque si se conserva el aumento dentro de la transición entre horizontes (A/AC), análogo a lo que ocurre en NRM. Dentro del horizonte AC los parámetros NRM y ARM tienden a incrementarse hacia el fondo, mientras que en $SIRM_{IT}$ ocurre lo contrario. En el caso del horizonte C, ARM y $SIRM_{IT}$ muestran curvas semejantes entre sí, y opuestas a NRM, decreciendo este último en el fondo del suelo. Para $SIRM_{IT}/\chi$ (**Figura 28f**), con excepción de la parte inferior del horizonte AC, el resto del perfil magnético tiene una gráfica con un comportamiento opuesto al que se registra en χ .

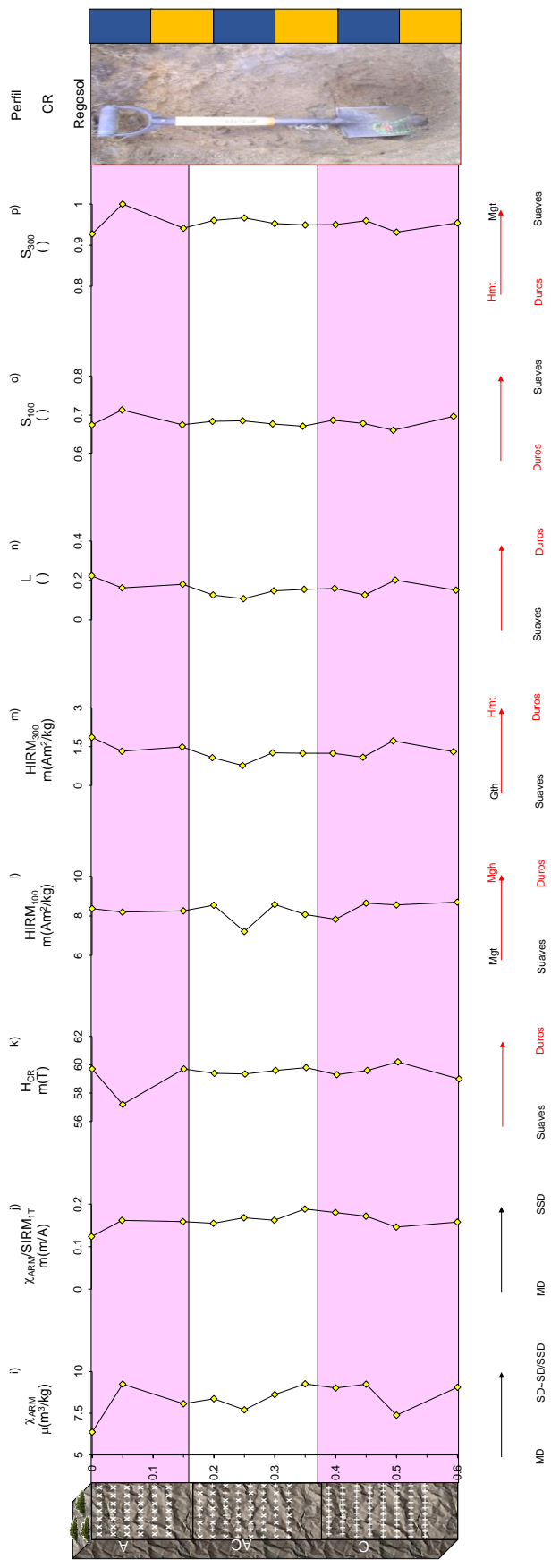
Por otro lado, los perfiles magnéticos asociados con los dominios magnéticos se caracterizan, en general por tener pocas y suaves variaciones a lo largo del perfil. En $\chi_{fd\%}$ (**Figura 28g**) resalta el aumento abrupto que se observa en la parte superior, así como sus bajos valores (**Tabla 10**) y su tendencia homogénea, casi constate.



Figuras 28.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en CR. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad del Nevado de Toluca, dentro de la región 3 en el volcán Nevado de Toluca (VNT). Este suelo se ha clasificado como un Regosol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/ó la fotografía del mismo (Figura 28.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f^o), el tamaño de dominio (perfiles f^o-j), así como el espectro de coercitividad ó *dureza* (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil SIRM₁₀₀/χ_R (f^o) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración/dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento -MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocien con granos de baja coercitividad (Mgt₊ p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Ght/Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros. ver Apéndice).

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VNT)



Figuras 28 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en CR.

Por el contrario, el gráfico de ARM/IRM₁₀₀ muestra una mayor y más frecuente variación en su curva, especialmente dentro del horizonte AC (**Figura 28h**), en donde el comportamiento es contrario al que se registra en $\chi_{fd\%}$. Hacia el fondo del suelo, se observa un suave repunte. Los perfiles magnéticos de χ_{ARM} y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ poseen curvas cuyos comportamientos son similares entre sí, con suaves, pocas y graduales cambios (\sim constante), así como una tendencia creciente hacia la parte baja del perfil.

Los parámetros de coercitividad se pueden reagrupar en tres tipos de curvas de acuerdo con las tendencias que se registran en sus gráficas: 1) H_{CR} y L (**Figuras 28 k, l**) que poseen una relativa tendencia decreciente desde la parte superficial del horizonte A (más evidente en L) hacia la parte media del horizonte AC, aumentando posteriormente hasta el fondo del perfil, con dos cambios relativamente abruptos en la transición entre los horizontes AC y C así como en la parte baja de este último. El segundo grupo lo integran las curvas de HIRM (**Figuras 28 l,m**), ambas con tendencias decrecientes, con un comportamiento opuesto en la transición entre los horizontes A/AC, y donde resalta el decremento relativo y abrupto en la región media del horizonte AC. El último grupo lo componen el resto de los parámetros magnéticos S que tienen un comportamiento opuesto al que se presenta en L (**Figuras 28 o,p**).

5.3.4 Perfiles magnéticos de IGF1N

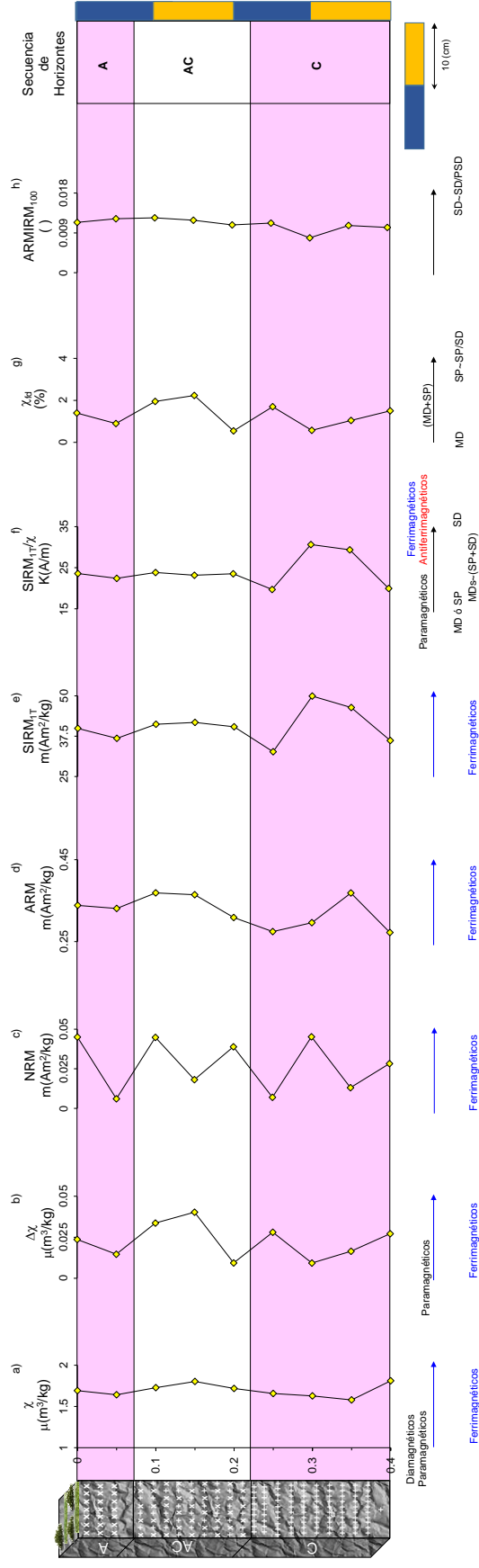
(Regosol, Ladera 1)

Los gráficos de los parámetros magnéticos de este suelo muestran curvas similares entre sí, con pocos cambios en la mayoría de estos (**Figuras 29a-p**). En los parámetros de concentración magnética (**Figuras 29a-f**) sobresalen las curvas de los perfiles de $\Delta\chi$ y NRM, debido a que en éstas se registra una mayor variabilidad con respecto al resto de los gráficos, siendo los cambios más abruptos en NRM (**Figuras 29 b,c**). Con excepción de χ (**Figura 29a**) en la parte baja del horizonte C, junto con los demás perfiles magnéticos ARM (**Figura 29d**), SIRM_{IT} (**Figura 29e**), SIRM_{IT}/ χ (**Figura 29f**) se observan gráficas con la misma tendencia. En general, decrecen en el horizonte A, a lo largo de AC se incrementan y en el fondo (transición AC/C) disminuyen, con un repunte en la parte superior del horizonte C. Decrecen hacia la parte inferior de éste, mientras que en χ aumenta.

En el caso de los perfiles magnéticos de dominio, sus curvas muestran en general, comportamientos con pocos y suaves variaciones (**Figuras 29g,h**). La curva de $\chi_{fd\%}$ es la que muestra una mayor y más clara variación, en especial dentro del horizonte AC (**Figura 29g**).

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VNT)

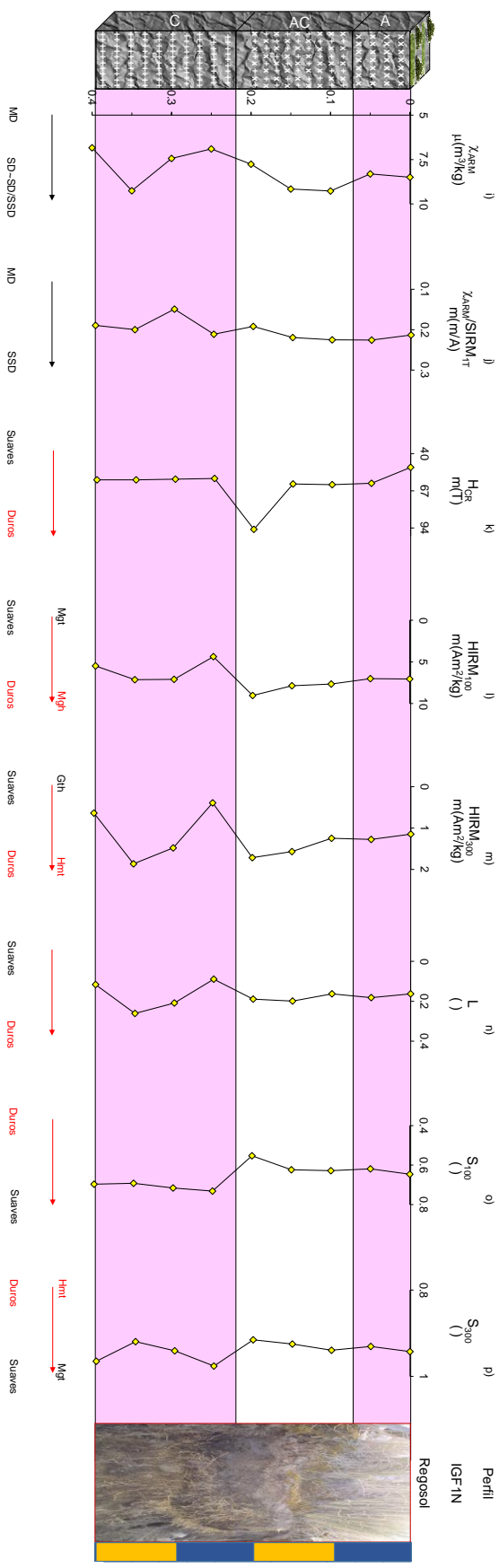


Figuras 29.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF1N. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad del Nevado de Toluca, dentro de la región 3 en el volcán Nevado de Toluca (VNT). Este suelo se ha clasificado como un Regosol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/o la fotografía del mismo (Figura 29.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f^o), el tamaño de dominio (perfiles f^o-j), así como el espectro de coercitvidades ó establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder magnéticas intrínsecas del suelo (concentración/dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Gh/Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros. ver *Apéndice*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas en la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VNT)



Figuras 29 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF-IN.

Los perfiles magnéticos de ARM/IRM₁₀₀ (**Figuras 29h**) y $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}_{\text{IT}}$ (**Figuras 29i**) tienen curvas semejantes, con una tendencia creciente a lo largo del horizonte A que se conserva hasta la parte superior del horizonte AC. Posteriormente decrecen hasta la parte superior del horizonte C, registrando un ligero repunte en el fondo del suelo. χ_{ARM} muestra el mismo comportamiento que los perfiles magnéticos descritos previamente, excepto en la transición entre horizontes ~AC/C (**Figura 29i**).

Por otro lado, los parámetros de coercitividad registran una estrecha similitud en la mayor parte de las curvas, y en general muestran pocas y suaves variaciones, además de ser consistentes entre sí (**Figuras 29k-p**). Las gráficas de H_{CR} , HIRM y L (**Figuras 29k-n**) tienen una tendencia creciente desde la parte superficial del horizonte A hasta la parte media del horizonte AC, con un incremento abrupto en la parte inferior de éste último horizonte. Se observa también un decremento en la transición entre los horizontes AC/C, aumentando todos los parámetros dentro del horizonte C, con excepción de la parte baja donde decrecen y en H_{CR} donde se mantiene constante. Los cocientes S (**Figuras 29o,p**) poseen curvas con tendencias opuestas a la que se registran en los perfiles magnéticos previos, es decir, en general reflejan una tendencia decreciente a lo largo del suelo, con un repunte ligero en la transición de los horizontes AC/C. Las curvas de HIRM₃₀₀ y L tienen comportamientos opuestos a los que se observan en S₁₀₀ (**Figuras 29 m,n,o**) IGF2N.

5.3.5 Perfiles magnéticos de IGF2N (Regosol, Ladera 2)

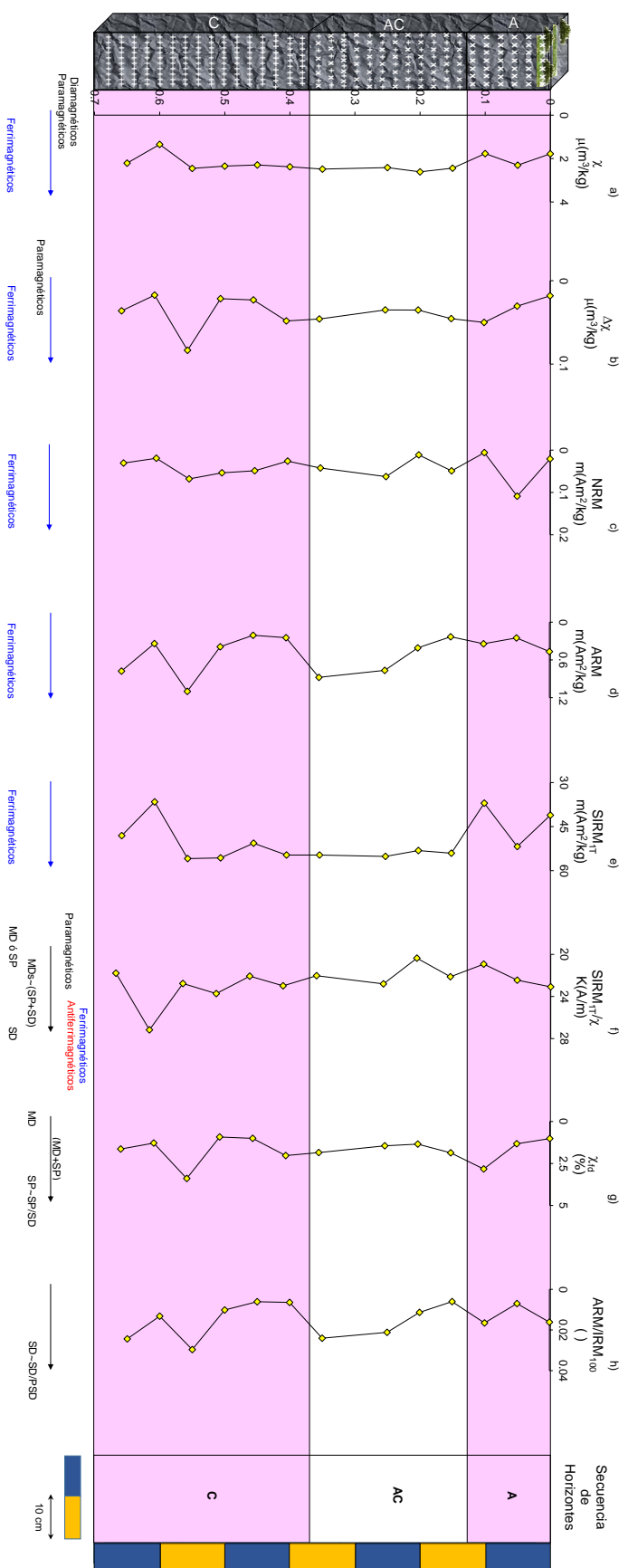
Los gráficos de los parámetros magnéticos de este suelo presentan curvas cuyos comportamientos y tendencias son muy similares entre sí, mismos que en general se caracterizan por su tendencia ~ creciente (**Figuras 30a-p**).

Los parámetros de concentración magnética son semejantes dentro del horizonte A en los parámetros χ (**Figura 30a**), NRM (**Figura 30c**) y SIRM_{IT} (**Figura 30e**), se incrementan con un cambio abrupto en la parte media del horizonte y decrecen hacia la transición con AC. El parámetro $\Delta\chi$ aumenta en el horizonte A, con los valores más bajos en la parte superficial, mientras que en los perfiles magnéticos de ARM y SIRM_{IT} éstos decrecen (**Figuras 30 b, d,f**). El horizonte AC muestra pocas y suaves variaciones en la mayoría de las curvas. Las gráficas de χ y $\Delta\chi$ (**Figuras 30a-b**) son opuestas (solo en la parte superficial), mientras que NRM (**Figura 30c**) y $\text{SIRM}_{\text{IT}}/\chi$ (**Figura 30f**) ambas poseen una tendencia decreciente a lo largo del horizonte, con un ligero repunte en la parte

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

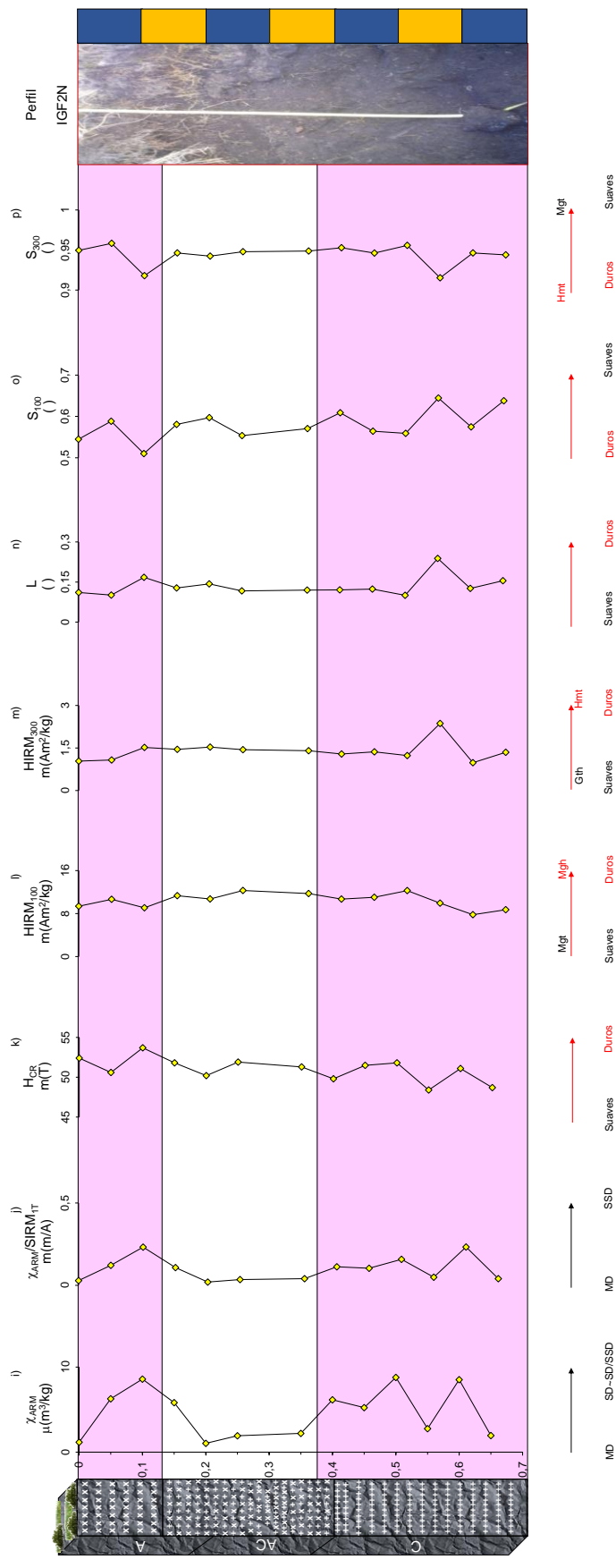
Capítulo 5:
Resultados (VNT)



Figuras 30.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF2N. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad del Nevado de Toluca, dentro de la región 3 en el volcán Nevado de Toluca (VNT). Este suelo se ha clasificado como un Regosol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la Figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/ó la fotografía del mismo (Figura 30.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f^o), el tamaño de dominio (perfiles f^o-j), así como el espectro de coercitividades ó dureza (perfiles k-j) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil $SIRM_{1T}/\chi$ (K^*) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración/dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Gh/Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros. ver Apéndice).

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VNT)



Figuras 30 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF2N.

media del horizonte así como en la transición con el horizonte C. El parámetro ARM muestra una tendencia creciente, $SIRM_{IT}$ refleja pocos cambios, mientras que $\Delta\chi$ tiene una tendencia contraria a la que existe en ARM (en la parte superior).

De manera general, dentro del horizonte C los perfiles magnéticos tienden a incrementarse hacia la parte inferior del suelo, reflejando un cambio abrupto en la parte baja del horizonte. $\Delta\chi$ y ARM tienen curvas iguales, con un ligero decremento en la parte inferior. El perfil de $SIRM_{IT}/\chi$ tiene la curva con mayor variación, con un comportamiento opuesto al que se observa en el resto de los parámetros magnéticos, mientras que en χ y NRM existen comportamientos parecidos.

Las gráficas de los parámetros de dominio magnético (**Figuras 30g-h**) presentan un relativo mayor grado de variabilidad con respecto al conjunto de perfiles magnéticos previamente descritos, y de manera general se les puede separar en dos grupos: 1) $\chi_{fd\%}$ (**Figuras 30g**) y ARM/IRM_{100} (**Figuras 30h**) y 2) χ_{ARM} (**Figuras 30i**) y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ (**Figuras 30j**) respectivamente. El primer grupo refleja una relativa mayor frecuencia de cambios a lo largo del perfil, observándose que en la parte superior de los horizontes A y AC muestran un comportamiento ~ opuesto entre sí. En el resto del suelo, ambas curvas tienen el mismo comportamiento, decrecen en las transiciones entre horizontes y tienen un aumento abrupto en la parte baja del horizonte C. El segundo grupo (**Figuras 30i-j**), tiene gráficos cuyas tendencias son similares entre sí, que se caracterizan por tener variaciones más abruptas, principalmente dentro del horizonte C, resaltando la tendencia decreciente que se observa en región superior del horizonte AC.

Por otro lado, con respecto a los parámetros de coercitividad ó dureza de los granos magnéticos, éstos tienen curvas relativamente similares, con poco y suaves cambios en la mayoría de éstas dentro del suelo (**Figura 30k-p**). El perfil de H_{CR} contiene una mayor variabilidad dentro de su gráfica, decrece en la transición entre horizontes ligeramente y presenta cambios abruptos en la región media de los horizontes A y C (**Figura 30k**). Los gráficos de los parámetros magnéticos HIRM (**Figuras 30l-m**) y L (**Figura 30n**) reflejan comportamientos similares, con pocos y graduales cambios, y una tendencia ~ a registrar curvas opuestas en la transición entre horizontes, en especial para HIRM. Los cocientes S (**Figuras 30o-p**) muestran curvas similares entre sí, con una ligera tendencia opuestas entre éstas en la parte baja del suelo. S_{100} (**Figura 30o**) presenta un comportamiento opuesto con respecto a la que se registra en H_{CR} (**Figura 30k**), mientras que S_{300} (**Figura 30p**) tiene una relativa mayor similitud con el mismo parámetro respectivamente.

5.3.6 Perfiles magnéticos IGF1D

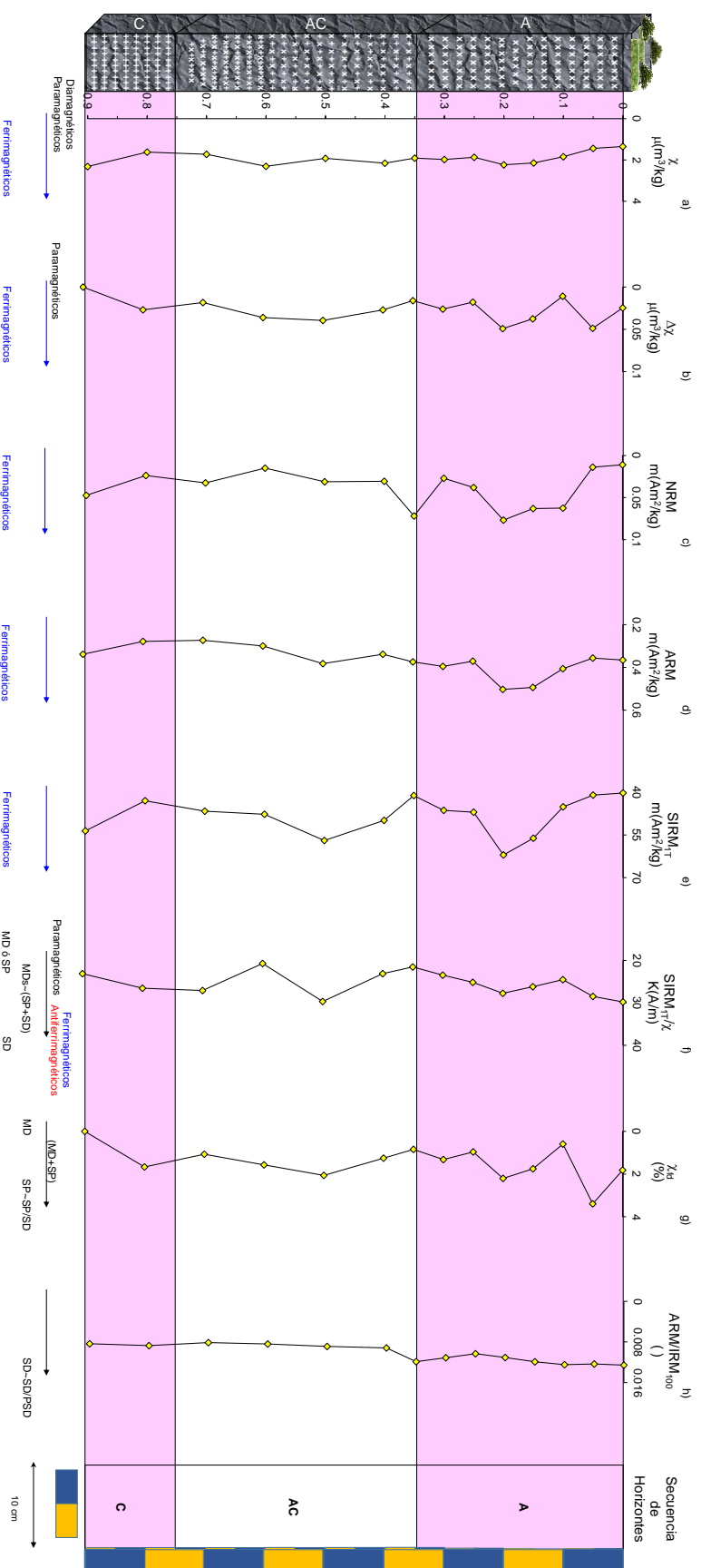
(Regosol, Ladera 3)

De manera general, los parámetros magnéticos del suelo muestran curvas similares y congruentes entre sí, mismas que tienden a registrar pocas variaciones, siendo la parte superficial del suelo la región que muestra los cambios más abruptos relativamente (**Figuras 31a-p**).

Los parámetros de concentración magnética (**Figuras 31a-f**) son los que muestran curvas con la mayor y mejor definición de los cambios en sus gráficos, con excepción de $SIRM_{IT}/\chi$ (**Figura 31f**), en el cual se observa un comportamiento opuesto al que presentan los demás parámetros (decrecen). La curva de χ aumenta gradualmente en el horizonte A, horizonte donde $\Delta\chi$ tiene una mayor variabilidad (**Figuras 31a,b**). Los parámetros de NRM (**Figuras 31c**), ARM (**Figuras 31d**) y $SIRM_{IT}$ (**Figuras 31e**) se incrementan, registrando un cambio (~ abrupto) en la región media del horizonte, mientras que en $SIRM_{IT}/\chi$ disminuye a lo largo del horizonte con pocos cambios (**Figuras 31f**). En el horizonte AC, los perfiles magnéticos de χ , $\Delta\chi$, $SIRM_{IT}$ y $SIRM_{IT}/\chi$ (**Figuras 31 a,b e,f**) aumentan en la parte superior de éste, registrando un cambio abrupto (~ región superior/media) en los gráficos de $SIRM_{IT}$ y $SIRM_{IT}/\chi$ (**Figuras 31e-f**), mientras que en el resto de los parámetros sus gráficos disminuyen. Dentro del horizonte C, con excepción de las gráficas de $\Delta\chi$ y $SIRM_{IT}/\chi$ (ambas decrecen), los demás parámetros registran un comportamiento opuesto (**Figuras 31b,f**).

Por otro lado, para los parámetros de dominio magnéticos (**Figuras 31g-j**) las gráficas de éstos se pueden agrupar en tres tipos diferentes conforme a sus tendencias: 1) $\chi_{fd\%}$ (**Figura 31g**) como la curva con mayor número de cambios, decrece en el horizonte A con dos cambios abruptos en la parte superior y en el fondo del horizonte, se incrementa en la parte superficial de AC y decrece posteriormente, con un ligero repunte en la transición entre horizontes (AC/C). El segundo grupo lo integra el perfil magnético ARM/IRM₁₀₀, el cual muestra una clara tendencia decreciente, con pocas y suaves variaciones a lo largo del suelo (**Figura 31h**). El resto de los parámetros magnéticos (χ_{ARM} y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$) conforman el tercer grupo de curvas (**Figuras 31i-j**) respectivamente. En estos se registran comportamientos iguales entre sí, con un comportamiento relativamente constante, con pocas y suaves cambios dentro del perfil, con excepción de la región media del horizonte A, donde hay un decremento.

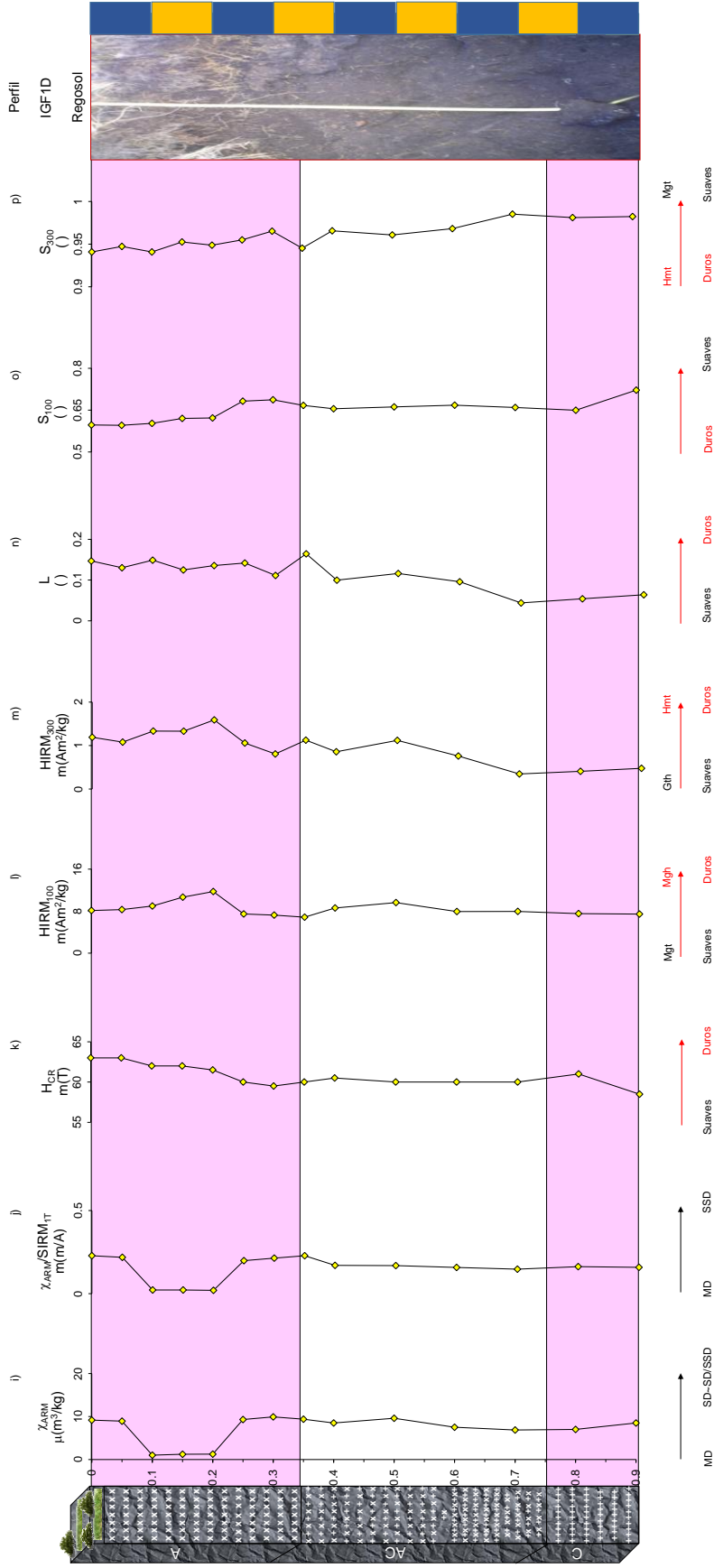
Con relación a los parámetros magnéticos de dureza, éstos son congruentes y similares entre sí, con pocas y suaves variaciones (**Figuras 31k-p**). En el horizonte A, H_{CR} (**Figura 31k**) y L (**Figura 31n**) son semejantes, con una mayor variabilidad relativa en el segundo, mientras que en el



Figuras 31.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF1D. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad del Nevado de Toluca, dentro de la región 3 en el volcán Nevado de Toluca (VNT). Este suelo se ha clasificado como un Regosol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/ó La fotografía del mismo (Figura 31.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f^u), el tamaño de dominio (perfiles f^u-j), así como el espectro de coercitividad ó *dureza* (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil SIRM_T/χ (f^u) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración/dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios (SP+SD) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Ghb/Hm, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros. ver Apéndice).

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VNT)



Figuras 31 (Continuación).- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF1D.

resto de los parámetros magnéticos dentro del mismo horizonte, sus curvas se comportan de manera contraria. Los perfiles magnéticos de HIRM poseen gráficas similares entre sí, aunque en el caso de HIRM₃₀₀ (**Figura 31m**) se preservan mejor las variaciones con respecto a HIRM₁₀₀ (**Figura 31l**), y ambos presentan un comportamiento opuesto al que tiene L (**Figura 31n**). Este último parámetro decrece a lo largo del suelo, con un repunte en la parte baja del perfil (**Figura 31n**). En el caso de los cocientes S (**Figuras 31o-p**) estos tienen curvas semejantes entre sí, y solo en el horizonte A con el perfil magnético de L. Son opuestos a H_{CR} (parte superior del suelo), así como en S₃₀₀, y totalmente contraria su tendencia a la que se observa en S₁₀₀.

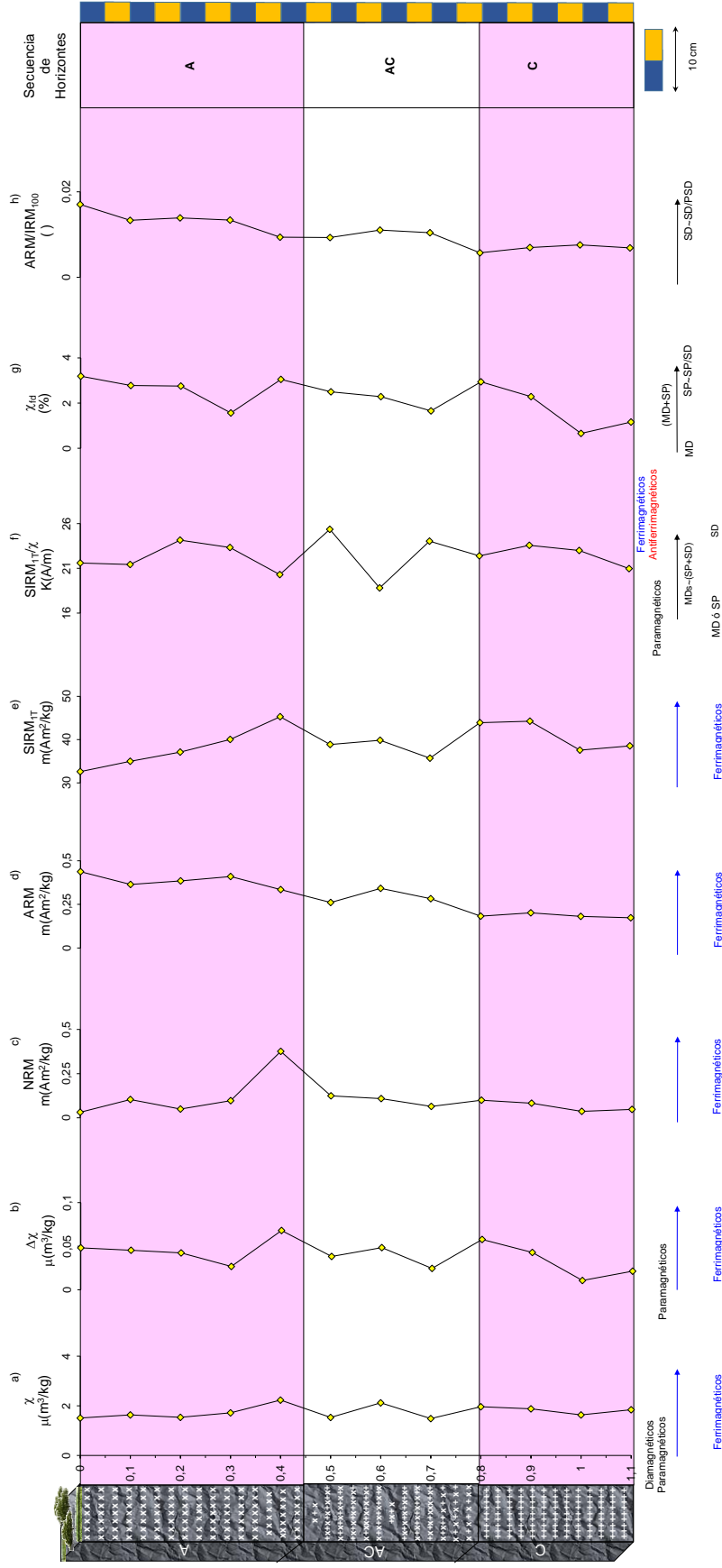
5.3.7 Perfiles magnéticos IGF2D

(Regosol, Ladera 4)

Las curvas de los parámetros magnéticos de este suelo tienen comportamientos relativamente similares entre sí, con tendencias mejor definidas así como pocos, suaves y graduales cambios en la mayor parte de los perfiles (**Figuras 32a-p**).

De acuerdo con las curvas de concentración magnética, éstas se pueden separar de manera generalizada, en dos grupos de acuerdo con el comportamiento de las mismas: 1) χ , NRM y SIRM_{1T} con tendencias crecientes (**Figuras 32a, c, e**) y 2) $\Delta\chi$, ARM con curvas con un comportamiento contrario (decrecen a profundidad). En el caso de SIRM_{1T}/ χ (**Figura 32f**) aunque refleja una mayor variabilidad análoga a la curva de $\Delta\chi$, presenta una curva creciente aunque no tan definida como los gráficos del grupo uno. En la transición entre horizontes, con excepción de ARM y SIRM_{1T}/ χ , en el resto de los perfiles magnéticos se registra un suave incremento de sus curvas. Los resultados resaltan los cambios relativamente abruptos dentro de los horizontes A (NRM, ARM, SIRM_{1T}/ χ) en la región media (**Figuras 32 c,d, f**), así como en la región superior/media del horizonte AC, en especial para $\Delta\chi$, NRM y SIRM_{1T}/ χ (**Figuras 32 b,c,f**). En el caso del horizonte C, son perfiles que registran pocos y suaves cambios, excepto en $\Delta\chi$, SIRM_{1T} (ambos con comportamientos semejantes) y SIRM_{1T}/ χ (**Figuras 32b, e-f**).

Los parámetros de dominio magnético muestran relativamente pocas variaciones en sus curvas, y de acuerdo con sus tendencias se pueden reagrupar en dos conjuntos: 1) los perfiles magnéticos $\chi_{fd\%}$ (**Figura 32g**) y ARM/IRM₁₀₀ (**Figura 32h**) y 2) χ_{ARM} (**Figura 32i**) y $\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$ (**Figura 32j**) respectivamente. En el primer grupo, se observan tendencias decrecientes, con los valores más altos en la parte superficial del suelo, con cambios mejor definidos en $\chi_{fd\%}$.

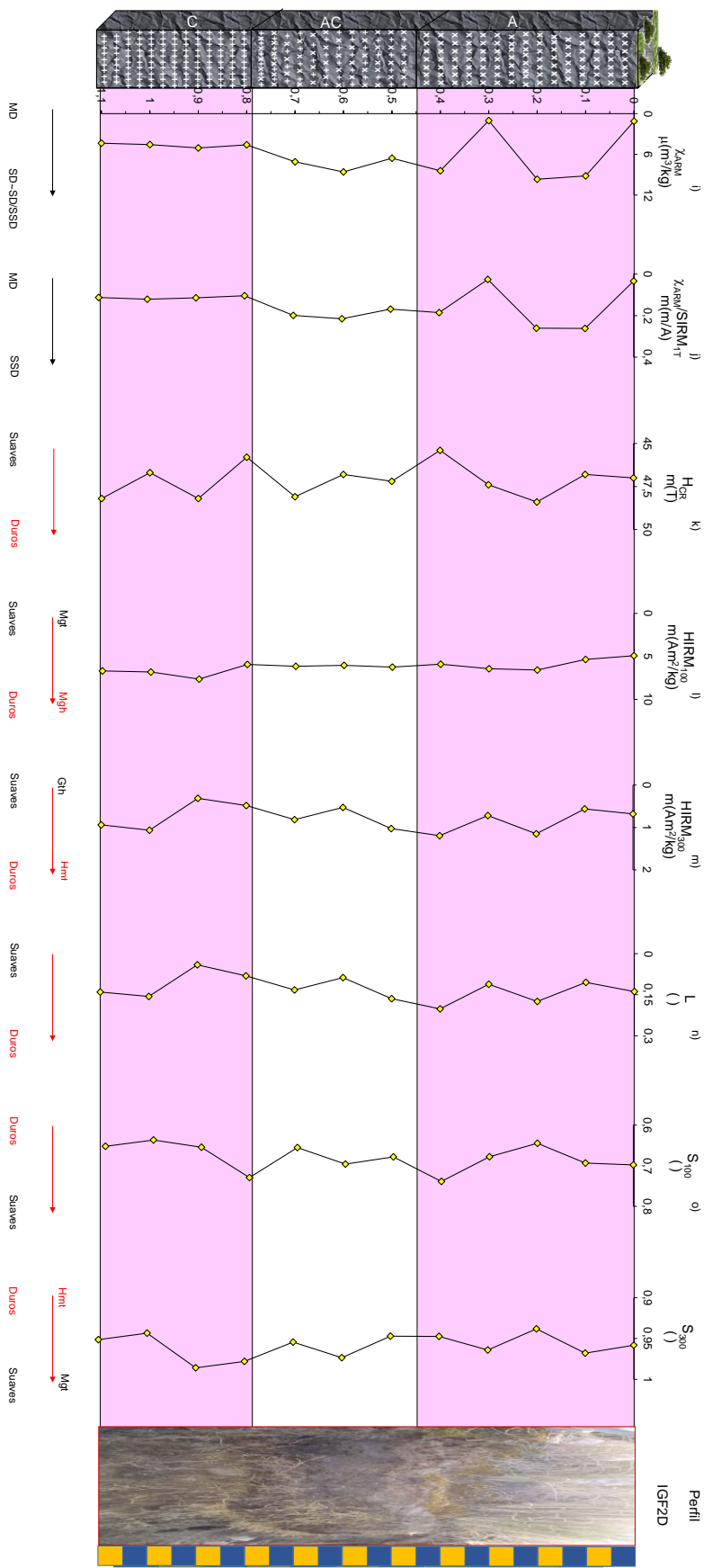


Figuras 32.- Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF2D. La figura contiene la relación (variaciones) de los parámetros magnéticos del perfil con la profundidad (lo que en este documento se denomina como: *perfiles magnéticos*). El suelo se encuentra en la localidad del Nevado de Toluca, dentro de la región 3 en el volcán Nevado de Toluca (VNT). Este suelo se ha clasificado como un Regosol, en su unidad pedológica fundamental. En los extremos de la izquierda de la figura se muestra la representación del perfil pedológico, mientras que en el extremo de la derecha se presenta una escala gráfica, la representación esquemática de sus horizontes y/o la fotografía del mismo (Figura 32.- continuación). Los *perfiles magnéticos* son utilizados como un registro de datos a partir de los que puede inferir información sobre la concentración (perfiles a-f), el tamaño de dominio (perfiles f-j), así como el espectro de coercitividades ó *dureza* (perfiles k-p) de las partículas magnéticas presentes en el suelo. Los datos obtenidos contribuyen para tener una caracterización más completa de los horizontes del suelo y poder establecer la composición de la mineralogía magnética del suelo. El perfil $SIRM_{ir}/\chi$ (%) denota la sensibilidad del cociente magnético para inferir información sobre dos propiedades magnéticas intrínsecas del suelo (concentración/dominio). Las siglas MDs se utilizan para señalar la mezcla de granos de dominios ($SP+SD$) con un comportamiento ~MD. La dureza de las partículas magnéticas se utiliza para inferir información sobre la fracción magnética de alta coercitividad, de manera que granos magnéticamente suaves se asocian con granos de baja coercitividad (Mgt, p.ej.), mientras que partículas magnéticas duras corresponden a una mayor coercitividad (Ght/Hmt, p.ej.). Para la interpretación de los perfiles magnéticos se toman como referencia diversos reportes previos como: (Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; entre otros. ver *Apéndice*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas en Secuencias Volcánicas como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VNT)



Figuras 32 (Continuación). - Gráficas de los perfiles magnéticos analizados en IGF2D.

En el caso de ARM/IRM₁₀₀, con una tendencia más suave, tienden a registrar dentro de los horizontes AC y C un comportamiento opuesto al que se reporta para $\chi_{fd}\%$. El segundo grupo de curvas muestra gráficos iguales (**Figuras 32i-j**), con cambios abruptos en el horizonte A, así como un comportamiento constante en su región media. Dentro del horizonte AC, las curvas tienden a decrecer suavemente con un suave repunte en la parte inferior, mientras que en el horizonte C son casi constantes.

Por otro lado, los perfiles magnéticos de dureza, muestran comportamientos semejantes entre sí, con cambios relativamente frecuentes y abruptos, dentro de una tendencia generalizada, a incrementarse (**Figuras 32k-p**). El gráfico de H_{CR} (**Figura 32k**) tiene un cambio abrupto en la región media del horizonte A, lo que se observa también en HIRM₃₀₀ (**Figura 32m**), y en L (**Figura 32n**), siendo opuesta la tendencia y los cocientes S (**Figuras 32o-p**), mientras que en HIRM₁₀₀ (**Figura 32l**) la curva se incrementa gradualmente a lo largo del horizonte. En el horizonte AC, los perfiles H_{CR}, L y S₃₀₀ aumentan, siendo el primero el parámetro magnético que mayor variabilidad muestra dentro del horizonte, HIRM₁₀₀ tiende a incrementarse suavemente, mientras que S₃₀₀ en la parte baja del horizonte registra un aumento abrupto. El resto de los parámetros (HIRM₃₀₀, L, S₁₀₀) poseen un comportamiento opuesto (decrecen) al que registran los perfiles magnéticos descritos previamente para el horizonte AC (**Figuras 32m-0**). En el horizonte C, H_{CR} presenta cambios abruptos y una curva opuesta a la que tienen HIRM y L, análogo a lo que ocurre entre el perfil magnético de L y S₃₀₀ respectivamente.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 5:
Resultados (VNT)

Tabla 10.- Valores registrados en algunos de los parámetros magnéticos de los suelos del volcán Nevado de Toluca

Parámetros magnéticos	CR (A-AC-C)	IGF1N (A-AC-C)	IGF2N (A-AC-C)	IGF1D (A-AC-C)	IGF2D (A-AC-C)
χ $\mu(\text{m}^3/\text{kg})$	3,65	1,81	2,23	2,31	2,61
	1,76	1,57	1,48	1,35	1,34
	2,43	1,69	1,75	1,91	2,21
SIRM _{1T} m(Am ² /kg)	57,38	49,91	45,29	62,00	55,88
	45,83	32,66	32,58	40,23	36,60
	52,11	40,57	39,06	48,32	49,88
χ_{fd} (%)	35,2	2,23	3,19	3,38	3,39
	0,392	0,54	0,65	0	0,921
	4,23	1,31	2,23	1,46	1,68
ARM/IRM ₁₀₀ (-)	0,002	0,012	0,017	0,012	0,198
	0,001	0,007	0,005	0,008	0,195
	0,002	0,010	0,010	0,010	0,014
χ_{ARM} $\mu(\text{m}^3/\text{kg})$	9,26	9,27	9,67	9,92	8,79
	6,37	6,84	1,03	1,02	1,03
	8,39	8,16	5,84	7,02	4,64
H _{CR} m(T)	60,2	95	48,4	63	53,7
	57,2	50	45,4	58,5	48,4
	59,35	62,83	47,16	60,78	51,01
S ₁₀₀ (-)	0,71	0,73	0,73	0,72	0,33
	0,66	0,55	0,63	0,59	0,98
	0,68	0,65	0,67	0,64	0,57

La tabla contiene los valores obtenidos para una selección de los parámetros magnéticos analizados en los suelos de la región 3, (VNT). De Izquierda a derecha, la primera columna corresponde con los parámetros magnéticos, de la segunda a la sexta columna corresponden a los valores obtenidos para cada perfil, mostrándose la secuencia de horizontes que componen a cada perfil. Los parámetros χ y SIRM_{1T} son utilizados como un registro de la concentración de las partículas magnéticas, mientras que χ_{fd} , ARM/IRM₁₀₀ y χ_{ARM} con un registro del dominio magnético. Los parámetros H_{CR} y S₁₀₀ son un registro de la dureza y/o coercitividad de los granos magnéticos. Cada tercia de datos corresponde, de arriba hacia abajo, con los valores máximos, mínimos y promedio respectivamente para cada parámetro dentro de cada suelo. Los perfiles son Regosoles.

DISCUSIÓN

“No se puede pensar que una búsqueda tan profundamente enraizada en la naturaleza humana sea del todo inútil y vana. La capacidad misma de buscar la verdad y plantear preguntas implica ya una primera respuesta”.

*FIDES ET RATIO
(Juan Pablo II)*

Capítulo 6

6 Discusión

6.1 Valle de Teotihuacán

6.1.1 Perfil CGBE

(Cambisol, cerro Gordo, cima)

Las curvas k vs T , indican que la mineralogía magnética es homogénea en casi todo el suelo, siendo las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt los minerales más abundantes a lo largo del perfil (**Figura 13 a,b**), que coexisten dentro del suelo con otros minerales magnéticos de coercitividads diversas como $Ti(Mgh)-Mgh$, Gth , Hmt , aunque su distribución a lo largo de éste es diferente (**Tabla 11a**). Esto se corrobora por la coloración del suelo (**Tabla 5**), los cambios registrados en k vs T y su grado de reversibilidad (**Figuras 13a,b**), las curvas de adquisición de IRM (**Figura 14a**), así como los perfiles de coercitividad/dureza magnética (H_{CR} , $HIRM$ p.ej.). Esto influye en las propiedades y las características magnéticas de sus horizontes (*Kapicka et al 2003, Jordanova et al., 2011*), que en su conjunto son dependientes de las condiciones de formación así como del ambiente en el que se desarrollan éstos (*Maher 1988, Dearing, 1994*).

De acuerdo con los parámetros descritos arriba, los horizontes superficiales (Ah) poseen el mayor grado de irreversibilidad ($\sim GR > |64.93|$) y una mayor concentración relativa de minerales metaestables como $Ti(Mgh)_{-Ti}$, Mgh producto de la maghemitización (oxidación parcial a bajas temperaturas) de $Ti(Mgt)-Mgt$, así como una recristalización parcial posterior a Hmt respectivamente (*Deng et al., 2001; Otake et al., 2007; Jelenska et al., 2010*). Esto sugiere su presencia como fases mineralógicas secundarias, así como el rol de las impurezas/cationes $\Delta(Al, Ti, p.ej.)$ que contribuyen al desfaseamiento en su T_C que registran las $Ti(Mgt)$ como han sugerido previamente varios autores (*Wall, 2000; Sosa y Alvarado, 2010*). No obstante la presencia de las fases meta estables secundarias en el suelo, también existe la presencia aunque en menor proporción de Hmt primaria y secundaria que se invierten y reducen para la neoformación de Mgt .

Estos resultados son congruentes con los perfiles magnéticos analizados para la parte superficial del suelo (**Figuras 15a-p**). El mayor grado de irreversibilidad en el horizonte Ah_1 coincide con los bajos valores de χ , $\Delta\chi$ y NRM , lo que refleja una mayor contribución de

paramagnéticos (**Figuras 15a-c**). Esto se asocia con los valores más bajos de ARM y $SIRM_{IT}$, lo que indica que la concentración de ferrimagnéticos es menor en la parte superficial del suelo (**Figuras 15d,e**), a pesar de la mezcla de minerales de baja y alta coercitividad que existen en el suelo (**Figuras 15k-p**). Los parámetros de coercitividades señalan una dispersión diferida de los minerales magnéticos duros con cambios sutiles en su composición/concentración y distribución (**Figuras 15k-p**). Los valores constantes de L, con una tendencia ligera a incrementarse en la parte superior del suelo, sugieren que HIRM y S (**Figuras 15l-p**) son registros de la presencia Gth y/ó Hmt (*Liu Q et al., 2007 y 2015; Su et al., 2015*) y de la variación en su concentración (*Liu et al., 2013*). De acuerdo con los parámetros magnéticos de dominio, en los horizontes superficiales existe una mezcla de granos MD (**Figuras 15g, j**) que coexisten con un aumento relativo y gradual en el contenido de SP (**Figura 15g**) un decremento de partículas SD y su límite con SD~SD/PSD y SD/SSD (**Figuras 15h-j**). La presencia de partículas gruesas en el suelo, el decremento superficial de SD y el aumento de SP, así como el comportamiento de los perfiles de HIRM y S reflejan una transformación gradual e intensa de la mineralogía magnética en la parte superficial, mientras que en Ah₂ ésta ha sido más rápida.

Por otro lado, en el horizonte Bw, las curvas k vs. T son más reversibles ($\sim GR > |7.5|$), lo que sugiere la presencia de una mineralogía magnética más estable (**Figura 15b**). Predominan las $Ti(Mgt)_{Ti}$ con una menor cantidad de impurezas, un decremento en el contenido de $Ti(Mgh)$, Mgh y Hmt metaestables, así como una mayor concentración relativa de Gth. Esto es congruente con los incrementos en los parámetros de concentración (**Figuras 15a-f**) que indican una mayor abundancia de ferrimagnéticos con respecto a los horizontes superficiales. El suave decremento en χ , $\Delta\chi$, $SIRM_{IT}/\chi$ señala un posible ligero repunte de paramagnéticos (**Figuras 15a,b,f**) así como las suaves variaciones en los parámetros de dureza (**Figuras 15k-p**) señalan un cambio en la distribución y composición de los minerales de alta coercitividad. Los gráficos de H_{CR} y S_{300} (**Figuras 15k,p**) indican una mezcla de coercitividades dentro del horizonte, lo que es congruente con las curvas k vs T (**Figura 13a**) y de adquisición de IRM (**Figuras 14a**) respectivamente. El contenido de Hmt en el horizonte es variable, y ésta coexiste con Gth, siendo mayor la concentración de ésta última en la parte media del horizonte, donde se observan decrementos en H_{CR} y HIRM (**Figuras 15k-m**), así como el incremento en S (**Figuras 15o, p**) respectivamente. De acuerdo con *Liu C.* y colaboradores (*2012*), las tendencias opuestas entre los parámetros HIRM y S pueden ser evidencia de que el origen de la Hmt se debe a una neoformación debido a una pedogénesis intensa, incluso mayor que a una probable disolución que contribuye a la alteración de la mineralogía magnética. Otra posible

explicación es que el horizonte también recibe el aporte de Ti(Mgh)/Mgh (variaciones HIRM, incrementos en remanencias p.ej.,) como fase magnética responsable de las variaciones en el espectro de coercitividad (*Yamazaki e Ikahara, 2012; Su et al., 2015*). El predominio de granos SP y SD, así como la poca evidencia de una presencia significativa de granos MD, y la alta concentración de ferrimagnéticos dentro del horizonte con respecto a los horizontes Ah, sugiere una rápida alteración del horizonte Bw, aunque esta no es tan intensa como ocurre en la parte superficial del suelo.

6.1.2 Perfil CGN

(Cambisol, cerro Gordo, ladera)

En este perfil, la mineralogía magnética es relativamente homogénea dentro de todo el suelo, y muestra una estrecha semejanza con respecto a la que se existe en el Cambisol previo (**Tabla 11b**). De acuerdo con las curvas k vs T (**Figuras 13c-d**) las Ti(Mgt)-Ti, Mgt son las fases magnéticas que predominan, aunque éstas se encuentran mezcladas con otros minerales con una concentración y distribución diferente. Al igual que en CGBE, la parte superficial del suelo muestra un menor grado de reversibilidad de sus curvas $|\sim GR \geq 25.28|$, lo que es indicativo de una alta susceptibilidad de los minerales para alterarse con una relativa facilidad. En ese sentido, y contrario a que ocurre en CGBE, el perfil muestra una mayor concentración relativa de Gth con curvas k vs T mejor definidas, $T_c < 200^\circ\text{C}$, temperatura por debajo del límite promedio propuesto para su deshidratación (*Ozdemir y Dunlop, 2000; Jelenska et al., 2010*), con un contenido y distribución variable de Hmt y Ti(Mgh)-Ti, Mgh. Esto se corrobora con las tonalidades que muestra el suelo (**Tabla 5**), así como las variaciones que se registran en sus perfiles magnéticos (**Figuras 16a-f, k-p**) mismos que denotan el espectro variable de coercitividades, lo que varios autores asocian como un registro del grado de pedogénesis de un perfil (*Deng et al., 2004; Lu Sh et al., 2012*).

Los resultados señalan que los horizontes Ap y Ah poseen Ti(Mgt)-Ti, Mgt cuyo contenido de Ti en general es relativamente mayor con respecto a la del perfil CGBE, como podría sugerir la disminución ($\sim 1/3$) que se registra en las curvas de adquisición de IRM (CGN < CGBE) del perfil (**Figuras 14a,b**). Esto es consistente con los altos valores en las remanencias que indican la mayor concentración de ferrimagnéticos (**Figuras 16d,e**), y que está relacionado con la mayor concentración de paramagnéticos dentro de estos horizontes como lo sugieren los valores bajos de NRM, SIRM_{IT}/ χ (**Figuras 16b,f**). Los valores bajos H_{CR} , asociado con el incremento de χ y HIRM respectivamente reflejan la neoformación de fases ferrimagnéticas secundarias (*Liu Z et al., 2013*),

lo que también se relaciona con el grado de irreversibilidad (*Deng et al., 2004*). Esto es congruente con la presencia de $Ti(Mgh)_{-Ti}$, Mgh y la Hmt, ambas meta estables que se registra en k vs T, aunque no tan definida, ni con la misma proporción que se observa en el perfil CGBE. Su coloración, hacia el espectro (~10YR) es indicativo de la presencia de Gth (*Torrent et al., 1980, Kumaravel et al., 2010*). El aumento en $\chi_{fd\%}$ (con valores que oscilan entre 3-5) reflejan una mezcla de dominios, MD+SP (*Lu Sh et al., 2008*), mientras que los altos y constantes valores en el resto de los parámetros relacionados con los dominios magnéticos (**Figuras 16g-j**) registran la presencia de SP así como una mayor abundancia de las partículas SD dentro de los horizontes. Éstas últimas tienden a disminuir hacia el horizonte Ah a medida que se incrementa el contenido de granos SP, resaltando la escasa presencia de granos MD. De acuerdo con varios autores, el factor L es indicativo de Gth y/ó Hmt (*Liu et al., 2007; Hao Q. et al 2009; Quinton, 2011*), lo que sugiere una mezcla de coercitividades en ambos horizontes, y que se ratifica en la variabilidad registrada en H_{CR} así como en las tendencias de los cocientes S. De acuerdo con *Liu y colaboradores (2013)* los valores altos de $HIRM_{300}$, reflejan que el mayor contenido de Hmt se encuentra en la parte superficial, lo que permite inferir que en la fracción magnéticamente dura de estos horizontes, se presenta un aumento de Gth que es inversamente proporcional al contenido de Hmt (*Liu Z., et al., 2013*). En el horizonte Ah existe $Ti(Mgh)_{-Ti}$, Mgh que además de observarse en las curvas k vs. T se observa en los altos valores de $HIRM_{100}$ y bajos valores de S_{100} que se registran con respecto al horizonte Ap (*Liu et al., 2007*).

Por otro lado, el resto del suelo (horizontes AB y BC) muestra una composición magnética con un relativo menor grado de alteración, al registrar curvas k vs. T más reversibles, en el que predominan las $Ti(Mg)_{-Ti}$, Mg, aunque probablemente con un mayor contenido de Ti y/ó elementos (**Figura 13b**). Esto también se refleja en la un incremento de paramagnéticos (valores bajos de χ , $\Delta\chi$ respecto a los horizontes A), el decremento en las curvas de adquisición de IRM (**Figuras 16a,b, y Figura 14b**), así como en el cambio en la composición y concentración de los minerales magnéticos duros (Hmt, Gth), que muestran una variación en el espectro de coercitividades y señalan que dentro del horizonte AB y BC (superficial) existe posiblemente un mayor contenido de Gth. El decremento que existe en el horizonte AB en los parámetros de dominio magnético (**Figuras 16g-j**) y sus valores homogéneos dentro del horizonte BC sugieren una disminución de los granos SP y SD, incrementándose la concentración partículas de mayor tamaño. Esto sugiere una tasa de transformación gradual y más lenta, relativamente, de la mineralogía magnética dentro de estos horizontes con respecto a los horizontes superficiales.

Tabla 11a.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de CGBE.

Perfil CGBE Cambisol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
Ah ₁	Ti(Mgt) _{Ti} , Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_C), ΔT_N 's, GR IRM ~ (dm/dH) Cielos histerésis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo, χ , SIRM _{IT} / χ ~ bajos, ARM, SIRM _{IT} ~ bajos	SIRM _{IT} / χ ~ cte., $\chi_{d0\%}$ ~ bajo, aumenta, ARM/IRM ₁₀₀ ~ decrece, χ_{ARM} ~ aumenta,	H _{CK} ≥ 50mT, HIRM ~ alto, L ~ alto, S ~ bajos,
Ah ₂	Ti(Mgt) _{Ti} , Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_C), ΔT_N 's, GR IRM ~ (dm/dH) Cielos histerésis Cocientes HIRM, S Color	NRM, χ ~ aumentan, $\Delta \chi$ ~ cte., ARM, SIRM _{IT} ~ aumentan	SIRM _{IT} / χ ~ aumenta, $\chi_{d0\%}$ ~ cte., ARM/IRM ₁₀₀ ~ aumenta, cte., χ_{ARM} ~ aumenta, $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ ~ decrece	H _{CK} ≥ 50mT, HIRM ~ variables, disminuyen, aumentan, L ~ cte., S ~ decrecen
Bw	Ti(Mgt) _{Ti} , Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_C), ΔT_N 's, GR IRM ~ (dm/dH) Cielos histerésis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ decrece, χ , $\Delta \chi$ ~ aumentan	SIRM _{IT} / χ ~ decrece, $\chi_{d0\%}$ ~ aumenta, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., χ_{ARM} , $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ aumentan	H _{CK} ≥ 50mT, L, HIRM ~ variables, disminuyen, aumentan, S ~ HIRM ⁻¹

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna respectivamente). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna) y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/o Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)_{Ti} (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mgt)_{Ti} (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh(maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), ΔT_C 's (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), ΔT_N 's (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs.T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (VT)

Tabla 11b.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de CGN.

Perfil CGN Cambisol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
Ap	Ti(Mg) ₁₋₁₀ , Mgt Ti(Mg)h, Mgn Hmt Gth	k vs. T ~ (A _{TC} ^S , A _{TN} ^S , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo, SIRM _{TR} /χ ~ bajo, χ ~ alto, ARM, SIRM _{TR} ~ altos, ctes., Ay ~ alto	SIRM _{TR} /χ ~ cte., χ _{0%} ~ decrece, aumenta, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., χ _{AN} , χ _{ANW} /SIRM _{TR} ~ altos	H _{CR} ≥ 50mT, HIRM ~ decrecen, L ~ aumentan, S ~ aumentan
Ab	Ti(Mg) ₁₋₁₀ , Mgt Ti(Mg)h, Mgn Hmt Gth	k vs. T ~ (A _{TC} ^S , A _{TN} ^S , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo, χ ~ decrece, SIRM _{TR} /χ ~ bajo, ARM, SIRM _{TR} ~ decrecen, Ay ~ cte.	SIRM _{TR} /χ ~ aumenta, χ _{0%} ~ cte., decrece, ARM/IRM ₁₀₀ , χ _{AN} , χ _{ANW} /SIRM _{TR} ~ decrecen	H _{CR} ≥ 50mT, HIRM ~ decrecen, cte., L ~ cte., S ~ aumentan, cte.
AB	Ti(Mg) ₁₋₁₀ , Mgt Ti(Mg)h, Mgn Hmt Gth	k vs. T ~ (A _{TC} ^S , A _{TN} ^S , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ aumenta, χ, Ay ~ cte., ~ bajo, ARM, SIRM _{TR} , SIRM _{TR} /χ ~ aumentan	SIRM _{TR} /χ ~ aumenta, cte., χ _{0%} ~ decrece, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., χ _{AN} , χ _{ANW} /SIRM _{TR} ~ aumentan	H _{CR} ≥ 50mT, HIRM ~ aumentan, L ~ cte., decrecen, S ~ bajos, aumentan
BC	Ti(Mg) ₁₋₁₀ , Mgt Ti(Mg)h, Mgn Hmt Gth	k vs. T ~ (A _{TC} ^S , A _{TN} ^S , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ aumenta, χ, Ay ~ cte., ~ bajo, ARM, SIRM _{TR} , SIRM _{TR} /χ ~ aumentan	SIRM _{TR} /χ ~ aumenta, cte., χ _{0%} ~ decrece, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., χ _{AN} , χ _{ANW} /SIRM _{TR} ~ aumentan	H _{CR} ≥ 50mT, HIRM ~ aumentan, L ~ cte., decrecen, S ~ bajos, aumentan

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna respectivamente). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad δ dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/6 Hmt, Mgn. La simbología representa Ti(Mg)₁₋₁₀ (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mg)₁₋₁₀ (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mg) (titanomagnetita), Mgt(magnetita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), A_{TC}^S (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), A_{TN}^S (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs. T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

6.1.3 Perfil MAS

(Calcisol, San Martín de las Pirámides)

La mineralogía magnética de este perfil es controlada por $Ti(Mgt)_{-Ti}/Mgt$, (**Figuras 13c,d**) aunque con un contenido variable de Ti y de otras impurezas que influyen en sus propiedades magnéticas (**Tabla 11c**). A diferencia de los perfiles magnéticos previos, en éste las curvas k vs T muestran un mayor grado de reversibilidad ($GR \sim |1.26|$) dentro del horizonte superficial (A_p), mientras que en los horizontes B_k es menor ($GR \sim |36.9|$), sugiriendo una menor contribución de $Ti(Mgh)_{-Ti}/Mgh$, así como de Hmt meta estable. La coloración del suelo sugiere la presencia de Gth ($\sim 10YR$) dentro del suelo (**Ovalles, 2003, Balsam et al., 2004**), lo que es congruente y más claro en las curvas k vs T del horizonte B_k , donde se observa una mayor variabilidad de los perfiles magnéticos. De manera generalizada, lo que predominan son las partículas ferrimagnéticas con una concentración y distribución diferente a lo largo del perfil.

En el horizonte A_p , la tendencia creciente de $\chi, \Delta\chi$ (**Figuras 17a,b**) inversamente proporcional con el decremento en las remanencias (**Figuras 17c**) indican que los granos ferrimagnéticos coexisten con minerales (dia/para)magnéticos (p.ej., M.O., Caol. Qz, $CaCO_3$, Px, etc) y con otros de coercitividad variable. Esto es consistente con las curvas de adquisición de IRM (**Figuras 14c**) que decrecen ($\sim 2/3$, MAS < CGBE), las variaciones en H_{CR} , los valores altos de HIRM, así como los relativamente bajos en S sugieren la coexistencia de minerales de alta y baja coercitividad (**Figuras 17k-p**). En ese sentido, los valores relativamente altos de HIRM y L (**Figuras 17l-n**) sugieren una mayor concentración de Hmt (**Liu Q. 2007; p.ej.,**) siendo de carácter secundario debido a la neoformación (**Liu Z et al., 2013**) a partir probablemente del bajo contenido de $Ti(Mgh)_{-Ti}/Mgh$ como producto de una incipiente tasa de maghematización de las $Ti(Mgt)_{-Ti}$. De acuerdo con Anderson (**2008**) tendencias opuestas entre los perfiles de HIRM son un indicador de la presencia de Mgt dura. La presencia de mezclas SP + MD con una contribución relativamente baja (valores de $\chi_{fd\%} \sim 3-5$) de los primeros (**Figura 17g**) y una mayor abundancia de los granos SD sugiere una transformación moderada de la mineralogía magnética (**Figuras 17h-j**).

El horizonte B_k contiene una mezcla de minerales magnéticos relativamente más heterogénea con una mayor concentración de minerales meta estables como $Ti(Mgh)_{-Ti}/Mgh$ y Gth, (**Figura 13d**). No obstante, predominan las $Ti(Mgt)$, Mgt, aunque la adquisición de IRM (**Figuras 14c**) es la más baja lo que sugiere una mayor contribución de impurezas $\Delta(Ti, CaCO_3)$ p.ej. Los bajos valores de NRM, con los relativamente altos y cambiantes valores $\chi, \Delta\chi$, así como los decrementos variables en $SIRM_{IT}$ son congruentes con la mineralogía magnética dominante dentro

del horizonte, y señalan que las partículas ferrimagnéticas son las más abundantes. Sin embargo, muestran una concentración/distribución influenciada por granos de coercitividades variables, (HIRM₃₀₀, L y S₃₀₀ p.ej.; **Figuras 17m,n,p**). De acuerdo con los parámetros de dominio magnético, el horizonte muestra un contenido relativamente homogéneo de granos SD (pocas variaciones en ARM/IRM₁₀₀, χ_{ARM} , $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$). Existe un contenido mayor de partículas MD en la parte superficial (bajos valores $\chi_{fd\%}$ y constantes en $SIRM_{IT}/\chi$), siendo mayor y más variable el aporte de éstos hacia la parte baja del horizonte, lo que sugiere un incremento de los granos SP en dicha región. Esto coincide con la mayor variabilidad en la concentración de (ferri/antiferri)-magnéticos lo que sugiere cambios abruptos e intensos en la transformación de la mineralogía magnética y las condiciones de formación del suelo.

Por otro lado, en el horizonte C lo que prevalecen son las Ti(Mgt)_{-Ti}, Mgt como las fases magnéticas dominantes aunque coexisten con otros minerales de coercitividades variables con una distribución diferente, lo que se refleja en los perfiles magnéticos analizados. Los valores homogéneos de χ y el aumento gradual de $\Delta\chi$ en el horizonte (**Figuras 17a,b**), reflejan un decremento de paramagnéticos que es inversamente proporcional con el aumento variable de ferrimagnéticos que se registra en las remanencias (**Figuras 17c-e**). Las curvas homogéneas de los cocientes ARM/IRM₁₀₀, χ_{ARM} y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ indican de manera general, la presencia de granos SD dentro de todo el horizonte (**Figuras 17 h-j**). Éstos se encuentran coexistiendo, de acuerdo con el registro de $\chi_{fd\%}$ (~ 3-5), con una mezcla de granos SP+MD (**Lu Sh., et al., 2008**). El contenido de SP es bajo ($\chi_{fd\%} \leq 3$), observándose un sutil aumento en la concentración de partículas MD (**Dearing, 1999**) en la parte superficial, incrementándose éstas hacia la parte inferior. Los parámetros de dureza magnética (**Figuras 17k-p**), indican que la fracción magnética dura del horizonte presenta un aumento relativo de Hmt hacia la parte baja (incrementos variables de H_{CR}, HIRM y L), que coexisten con la Ti(Mgt)/Mgt, siendo la Hmt el producto secundario de una pedogénesis intensa (**Liu C et al., 2012**). De acuerdo con Anderson (**2008**), los valores opuestos entre HIRM, dentro de la región media del horizonte, son un indicativo de la presencia de Mgt dura.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (VT)

Tabla 11c.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de MAS.

Perfil MAS Calceisol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
Ap	Ti(Mgt)-Ti, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_C), (ΔT_N), GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo, SIRM _{1T} / χ ~ bajo, χ ~ bajo ARM, SIRM _{IT} ~ $\Delta\chi$ ~ bajo	SIRM _{IT} / χ ~ decrece, $\chi_{60\%}$ ~ variable, ARM/IRM ₁₀₀ , χ_{ARM} , χ_{ARM} /SIRM _{IT} ~ decrecen	H _{CR} ≥ 50mT, HIRM ₁₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹ L ~ HIRM ₃₀₀ ~ (aumenta) S ~ decrecen
Bk	Ti(Mgt)-Ti, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_C), (ΔT_N), GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ aumenta, SIRM _{1T} / χ ~ incrementa,, χ ~ decrece, ARM, SIRM _{IT} ~ disminuyen,	SIRM _{IT} / χ ~ cte, $\chi_{60\%}$ ~ variable, decrece, aumenta,, ARM/IRM ₁₀₀ ~cte, χ_{ARM} , χ_{ARM} /SIRM _{IT} ~ aumentan	H _{CR} ≥ 50mT, ΔL ~ HIRM ~ S ⁻¹ , Δ HIRM ₃₀₀ ~ aumenta, HIRM ₁₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹ , S ₃₀₀ ~ decrece
C	Ti(Mgt)-Ti, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_C), (ΔT_N), GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ variable, χ ~ aumenta, $\Delta\chi$ ~ alto ARM, SIRM _{IT} ~ altos,	SIRM _{IT} / χ ~ altos, cte, $\chi_{60\%}$ ~ aumentan, ARM/IRM ₁₀₀ ~alto cte, decrece χ_{ARM} , χ_{ARM} /SIRM _{IT} ~ aumentan	H _{CR} ≥ 50mT, ΔL ~ Δ H _{CR} , HIRM ~ decrecen, L, HIRM ₃₀₀ ~ aumentan, S ~ aumentan

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna respectivamente). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/6 Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)-Ti (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mgt)-Ti (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh(maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), ΔT_C (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), ΔT_N (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs.T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

6.1.4 Perfil SNP

(Fluvisol, San Pablo)

A diferencia de los perfiles previos, en este suelo los resultados indican una mineralogía magnética más homogénea (curvas k vs T y adquisición de IRM) que está compuesta en su mayor parte por $Ti(Mgt)_{-Ti}/Mgt$ (**Figuras 13g,h y Figura 14d**). La variabilidad que se observa en éstas gráficas indica que las $Ti(Mgt)/Mgt$ se encuentran mezcladas con otras fases magnéticas de coercitividades variables (**Tabla 11d**), en menor concentración y con una distribución diferente dentro del suelo, lo que se refleja en sus perfiles magnéticos (**Kapicka et al., 2003; Jordanova et al., 2011**). Esto se corrobora, por el bajo grado de reversibilidad $\sim (GR \leq |5.5|)$, lo cual sugiere un relativo menor grado de alteración del suelo (**Deng et al., 2004; p.ej.,**). La concentración de ferrimagnéticos es relativamente baja dentro del suelo, y comparativamente semejante a la que se observa en MAS (**Figura 14d**). Los cambios registrados en la temperatura son indicadores de la presencia de Gth, que está mezclada con un bajo contenido de $Ti(Mgh)/Mgh$ y la presencia de Hmt metaestable.

En el horizonte Ap, los bajos valores de χ y $SIRM_{IT}$ en la parte superficial (**Figuras 18a,e**) y el decremento de $\Delta\chi$, NRM (**Figuras 18b,c**) sugieren que en esta zona existe una mayor concentración de paramagnéticos que se relaciona con un bajo contenido de partículas ferrimagnéticas, mientras que los perfiles de ARM, $SIRM_{IT}/\chi$ indican un incremento relativo de granos antiferrimagnéticos (**Figuras 18d,f**). De manera generalizada, el suelo presenta una mezcla heterogénea de dominios magnéticos SP+MD ($\chi_{fd\%} \sim 3-5$), que coexisten con un mayor contenido de SD (ARM/IRM_{100} , χ_{ARM} , $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$), así como con un escaso contenido de las SP (**Lu Sh et al., 2008**). De acuerdo con los parámetros de dureza magnética, éstos indican que el contenido de Hmt presente en el horizonte es variable (**Figuras 18k-p**). Diversos autores sugieren que los cambios en estos parámetros (aumento sutil en H_{CR} , HIRM y L), así como el suave decremento en el cociente S, en este caso ubicado en la parte media del horizonte, son evidencia de un sutil incremento de Hmt (**Liu et al 2007, Hao et al., 2009**), considerándolos incluso en ocasiones, como un registro del grado de intemperismo que da origen a la Hmt meta estable (**Liu et al., 2005; Liu C. et al., 2012**). La presencia de Gth se infiere a partir de la coloración del suelo ($\sim 10YR$), así como a T_c ($\sim T \leq 200^\circ C$), y la relación inversa en la concentración de los minerales de alta coercitividad (Gth/Hmt) que pueden estar presente en el suelo (**Torrent et al., 1980; Saffiudin et al., 2011**). Su coexistencia y alternancia en otros trabajos ha sido asociada con variaciones en la humedad, lo que influye en los

procesos redox del suelo (*Ozdemir y Dunlop, 2000; Cornell y Schwertmann, 2003; Xie et al., 2009*).

Por otro lado, el horizonte C, además de registrar un relativo menor grado de irreversibilidad en comparación con el horizonte Ap ($|1.53| < GR$), muestra mejor las $\Delta T_{c's}$ que sugieren la presencia de Gth (*Figura 13h*), así como las $Ti(Mgh)_{-Ti}/Mgh$ y Hmt meta estables, siendo relativamente mayor las primeras de estas fases. Las curvas de IRM son consistentes y reflejan la mezcla de minerales de coercitividades variables (*Figura 14d*). El incremento gradual de χ y $\Delta\chi$ indican un decremento inversamente proporcional con el contenido de paramagnéticos hacia la parte baja (*Figuras 18a,b*). Las remanencias (*Figuras 18d,e*), sugieren un sutil aumento de partículas ferrimagnéticas excepto en la región media del horizonte, siendo más evidente en $SIRM_{IT}$. De forma general, las tendencias de ARM/IRM_{100} , χ_{ARM} y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ sugieren la presencia de granos SD en todo el perfil que tienden a disminuir hacia la parte inferior, y se encuentran coexistiendo con la mezcla de granos SP+MD ($\chi_{fd\%} \sim 3-5$), siendo bajo el contenido de éstas últimas (MD) dentro del horizonte y decreciendo de manera inversamente proporcional con el aumento en la concentración de partículas SP hacia el fondo del suelo (*Lu Sh et al., 2008*). De acuerdo con los parámetros de dureza magnética el horizonte registra una mezcla de minerales de alta coercitividad, con un sutil aumento en la concentración de Hmt en la parte inferior, mientras que la mayor cantidad de Gth se ubica en la parte superficial.

6.1.5 Perfil OTM,

(Fluvisol, Otumba)

Los resultados indican que la mineralogía magnética del suelo es similar en todo el perfil, en el que predomina el bajo contenido de $Ti(Mgt)_{-Ti}/Mgt$, que se encuentran mezclados con otros minerales de espectro de coercitividades diferente como $Ti(Mgh)/Mgh$, Hmt y Gth, todas éstas en menor proporción y con una distribución variable (**Tabla 11e**). Esto se infiere a partir de la coloración del suelo (**Tabla 8**), el grado de reversibilidad y la variabilidad/desplazamiento ($\sim T_c$) de las curvas k vs. T (**Figuras 13i,j**), las pendientes y cambios en las curvas de adquisición (**Figura 14e**), así como en las variaciones que se registran en los perfiles magnéticos (**Figura 19**).

En el horizonte Ap, se observa un relativo mayor grado de irreversibilidad ($\sim (GR < |2.87|)$), observándose que los cambios a bajas temperaturas ($T_c \leq 150$) y la coloración del suelo sugieren la presencia de Gth, que coexiste con las $Ti(Mgt)_{-Ti}/Mgt$, observándose que éstas se encuentran mezcladas con una relativa abundante concentración de $Ti(Mgh)/Mgh$ y Hmt metaestable producto

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (VT)

Tabla 11d.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de SNP.

Perfil SNP Fluvisol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
Ap	Ti(Mg) ₁₋₃ Tr, Mgr Ti(Mg)h, Mgn Hmt Gth	k vs. T ~ (Ar ^{Cs} , (Ar ^{Ns} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ Bajo, χ _c ~ decrecen, ARM, SIRM _{Tr} , aumentan	SIRM _{Tr} /χ _c ~ cte.,, χ _{ARM} , ARM/IRM ₁₀₀ , decrecen, χ _{ARM} , ~ χ _{ARM} /SIRM _{Tr} ~ altos, ctes.	H _{cr} ≥ 50mT, HIRM ~ variables, L ~ cte., S ~ decrecen, aumentan
C	Ti(Mg) ₁₋₃ Tr, Mgr Ti(Mg)h, Mgn Hmt Gth	k vs. T ~ (Ar ^{Cs} , (Ar ^{Ns} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ Bajo, χ _c , Δχ ~ decrecen, ARM, SIRM _{Tr} , aumentan	SIRM _{Tr} /χ _c ~ aumenta, χ _{ARM} ~ aumenta, ARM/IRM ₁₀₀ , decrecen, χ _{ARM} , χ _{ARM} /SIRM _{Tr} ~ ctes., decrecen	H _{cr} ≥ 50mT, HIRM ~ variables, aumentan, L ~ aumenta, S ~ cte., decrecen

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna respectivamente). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad o dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/6 Hmt, Mgn. La simbología representa Ti(Mg)₁₋₃Tr (titanomagnetita con poco Ti), Mgr (magnetita), Ti(Mg)h (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mg)h (titanomagnetita), Mgn(magnetita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), Ar^{Cs} (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), Ar^{Ns} (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs. T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

probablemente de una maghemitización, al darse éste proceso a temperaturas por debajo de las T_c de éstas fases magnéticas primarias, que son mayores a 600°C .

En general, los bajos y homogéneos valores de $\Delta\chi$ y SIRM_{1T}/χ dentro del horizonte sugieren que el contenido de paramagnéticos es bajo, observándose un sutil incremento de éstos en la parte superficial del horizonte (**Figuras 19b, f**). El decremento de χ , NRM y SIRM_{1T} reflejan una disminución de ferrimagnéticos (**Figuras 19a, c, f**), y junto con el aumento de ARM (**Figura 19d**) sugieren el incremento de partículas antiferrimagnéticas. Las tendencias crecientes de $\text{ARM}/\text{IRM}_{100}$, χ_{ARM} , $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}_{1T}$ (**Figuras 19h-j**) hacia la parte inferior del suelo permiten inferir la presencia de granos SD dentro del horizonte, que aumentan hacia la parte inferior. Éstas se encuentran coexistiendo con una mezcla de SP+MD ($\chi_{\text{fd}\%}$), siendo bajo el contenido de MD y donde los granos SP son abundantes (*Dearing, 1999; Lu Sh et al., 2008*). Los parámetros de *dureza magnética* indican un espectro de coercitividades variables. De acuerdo con los resultados, las curvas opuestas entre los perfiles de HIRM (**Figura 19l, m**) son un indicativo de la presencia de Mgt dura en el horizonte (*Anderson, 2008*), mientras que HIRM_{300} y L (**Figuras 19m, n**) reflejan la presencia de Hmt (*Liu et al., 2013, p.ej.*), cuyo contenido disminuye hacia la parte superficial. En ese sentido, de acuerdo con Liu C. y colaboradores (*2012*), el comportamiento opuesto entre los cocientes HIRM y S se interpretan como la neoformación de Hmt por una pedogénesis intensa. El comportamiento opuesto entre HIRM_{100} y S_{100} denota la presencia de Mgh, corroborando así la información sugerida por las curvas k vs. T (*Liu et al., 2007*).

Por otro lado, las curvas k vs T señalan que la mineralogía magnética del horizonte AB presentan un relativo alto contenido de $\text{Ti}(\text{Mgt})_{-T}/\text{Mgt}$, que se encuentran mezcladas con una menor concentración de $\text{Ti}(\text{Mgh})/\text{Mgh}$, Gth, así como una mayor abundancia de Hmt meta estable. La presencia de estas fases se infiere también a partir del comportamiento registrado (dm/dH) en su curva de adquisición de IRM (**Figura 14e**), mientras que la Gth también es sugerida por la coloración ($\sim 10\text{YR}$) del suelo (*Ozdemir et al., 1993*). La disminución y bajos valores que se registran en χ , $\Delta\chi$, y NRM (**Figuras 19a-c**) son consistentes e inversamente proporcionales con el incremento de las remanencias (ARM, SIRM_{1T}). Esto sugiere la baja contribución de paramagnéticos, predominando en el horizonte las partículas ferrimagnéticas y antiferrimagnéticas, éstas últimas con una relativa mayor abundancia hacia la parte superior del horizonte. De manera generalizada, los parámetros de tamaño de grano (**Figuras 19g-j**) resaltan el bajo contenido de granos MD, registrando dentro de todo el horizonte principalmente la presencia de SD, así como los abundantes granos SP cuyo contenido se incrementa hacia la parte baja del horizonte. Los bajos

valores de H_{CR} y altos de S_{300} sugieren la presencia de granos de baja coercitividad, lo que es congruente con el aumento de ferrimagnéticos registrado en las remanencias (**Figuras 19k, p**).

El comportamiento opuesto entre los perfiles de HIRM son un indicativo de la presencia de Mgt dura (**Anderson, 2008**). De acuerdo con **Liu y colaboradores (2007)** y **Quinton (2011)**, en el horizonte existe una mezcla de minerales de alta coercitividad, en donde la Hmt es relativamente más abundante en la parte superficial. Reportes previos (**Liu Z., et al 2013 p.ej.**) han considerado que tendencias similares entre parámetros magnéticos ($\chi \sim$ HIRM) y a su vez opuestas al registro de H_{CR} (como se observa en este perfil) son indicativo de que la Hmt es producto de una neoformación, lo que es consistente con las curvas k vs T (**Figura 13j**), mientras que las curvas con comportamientos opuestos entre sí de los cocientes HIRM (**Figuras 19 l-m**) sugieren la presencia de Mgh (**Liu et al., 2007**)

6.1.6 Relación entre parámetros magnéticos

La construcción y uso de los diagramas de dispersión entre parámetros magnéticos se lleva a cabo con la finalidad de poder analizar y relacionar de manera conjunta las características de los perfiles en cada región (**Tabla 3**). Con ello, se puede complementar la información inferida sobre la composición de la mineralogía que integra a cada suelo adquirida con los perfiles y el resto de los parámetros magnéticos para obtener una interpretación integral que permita caracterizarla mejor en función de sus propiedades. De esta forma, se puede establecer su relación con el grado evolutivo y las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrollan los suelos.

Para ello, se parte de la hipótesis de poder establecer de forma indirecta información sobre la composición de la mineralogía magnética como una función de la concentración (χ vs $SIRM_{1T}$, χ vs $SIRM_{1T}/HIRM_{300}$). El gráfico $SIRM_{1T}/\chi$ vs H_{CR} , se utiliza para inferir la composición como una función de la concentración/coercitividad de los granos magnéticos asociando con los dominios magnéticos, y/o a partir del espectro de coercitividades ($HIRM_{300}$ vs S_{300} , S_{100} vs S_{300}) respectivamente. Otros esquemas de utilidad que se pueden usar son las relaciones H_{CR}/H_C vs M_{RS}/M_S , χ_{ARM} vs $SIRM_{1T}/\chi$, y ARM/IRM_{100} vs $\chi_{fd\%}$ todas ellas para poder establecer la interacción entre el tamaño de los dominios magnéticos.

Tabla 11e.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de OTM.

Perfil OTM Fluvisol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
Ap	Ti(Mgt ₁₋₇₅ , Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_{CS} , ΔT_{NS} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo χ ~ decrece, $\Delta\chi$ ~ bajo, ARM, SIRM _{IT} ~ altos	SIRM _{IT} / χ ~ bajo, aumenta $\chi_{60\%}$ ~ decrece, variable, ARM/IRM ₁₀₀ , bajo, aumenta χ_{ARM} , $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ aumentan	H _{CR} < 50mT, HIRM ~ decrecen, L ~ variable, aumenta, S ~ aumentan
AB	Ti(Mgt ₁₋₇₅ , Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_{CS} , ΔT_{NS} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ variable, bajo, χ $\Delta\chi$ ~ bajo, ARM, SIRM _{IT} , SIRM _{IT} / χ aumentan	SIRM _{IT} / χ ~ aumenta, cte.,, $\chi_{60\%}$ ~ aumenta variable, ARM/IRM ₁₀₀ , ~ cte.,, aumenta, χ_{ARM} , ~ $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ ~ aumentan, ctes.	H _{CR} < 50mT, HIRM ~ decrecen, L ~ variable, aumenta, S ~ aumentan

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna respectivamente). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/ó Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)₁₋₇₅ (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mgt)₁₋₇₅ (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh(maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), ΔT_{CS} (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), ΔT_{NS} (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs.T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

Con el diagrama χ vs $SIRM_{1T}$ (**Figura 33a**), se puede ver la interacción que existe entre la concentración de los parámetros magnéticos y su relación con la composición de la mineralogía magnética del suelo (*Thompson y Oldfield, 1986*). La susceptibilidad magnética (χ) es influenciada por la contribución de (para/anti/ferri/ferro) magnéticos, mientras que $SIRM_{1T}$ solo lo está por las partículas (ferri/ferromagnéticas). En el diagrama, sobre una diagonal se ubican el mayor contenido de Ti(Mgt), aumenta el contenido de ferrimagnéticos (Mgt, p.ej.) hacia el extremo superior derecho y éste decrece hacia el origen. En la parte inferior del esquema, hacia el origen con los valores más bajos para ambos parámetros, se incrementa la concentración de paramagnéticos, observándose que hacia el extremo opuesto (con valores bajos de $SIRM_{1T}$ y altos de χ) por debajo de la diagonal principal, se registra un incremento de partículas antiferrimagnéticas (Hmt ó Gth).

De acuerdo con los resultados, los suelos se pueden separar de manera general, en dos grupos principales: 1) sobre una diagonal, con una relación directa y relativamente proporcional, se ubican los suelos OTM, CGN y CGBE, siendo el primero el que registra los valores más bajos para los dos parámetros, mientras que CGBE muestra los valores más altos respectivamente. Con valores medios a estos dos extremos, se encuentra el perfil CGN, y 2) el resto de los suelos (MAS y SNP) que, tomando como referencia los valores mínimos de OTM, se ubican sobre una horizontal en la región medio/baja del esquema. En este subgrupo (2), los suelos muestran una distribución relativamente más compacta, con valores parecidos y comportamientos homogéneos para $SIRM_{1T}$ (OTM y SNP). El perfil MAS registra una mayor dispersión en χ , cuyos valores son más altos con respecto al resto de los perfiles de este subgrupo (2) de suelos.

Análogo al gráfico previo, en la relación χ vs $SIRM_{1T}/HIRM_{300}$ (**Figura 33b**), al emplear el cociente $SIRM_{1T}/HIRM_{300}$ se lleva a cabo el análisis de la composición de las partículas magnéticas a partir de su concentración basándose en la relación que existe entre los granos ferrimagnéticos con respecto a la abundancia de antiferrimagnéticos estables, p.ej., Hmt. De esta forma, los valores en el extremo superior izquierdo del diagrama se asocian con una mayor abundancia de minerales de baja coercitividad, mismos que decrecen hacia el origen, infiriéndose que hacia la parte inferior derecha aumenta la coercitividad.

De acuerdo con el diagrama, en éste se puede observar una tendencia que relaciona inversamente a los parámetros de los perfiles. Éstos muestran una mayor dispersión en la gráfica con respecto al diagrama anterior. Los perfiles OTM y SNP tienen los valores más altos del cociente y los más bajos en χ con respecto al resto de los suelos, mismos que muestran valores

semejantes y homogéneos de $SIRM_{IT}$, con una mayor dispersión de χ . Los perfiles CGBE y CGN presentan los valores más altos de susceptibilidad magnética.

Por otro lado, en el diagrama $SIRM_{IT}/\chi$ vs H_{CR} (**Figura 33c**), se relaciona la concentración/tamaño de dominio de las partículas magnéticas ($SIRM_{IT}/\chi$) con el espectro de sus coercitividades (H_{CR}). A partir de esto, se puede inferir la composición de la mineralogía magnética de los suelos (*Peters y Deckers, 2003; Peters y Thompson, 1998*). En la parte inferior derecha se ubica la mayor concentración de ferrimagnéticos, mientras que en la región superior izquierda el contenido de antiferrimagnéticos.

Los resultados reflejan un espectro de coercitividades semejantes en todos los perfiles, levemente más bajos en el perfil OTM y más altos SNP, mientras que con respecto al cociente, los suelos muestran una mayor dispersión, con los perfiles CGBE y CGN como los suelos que muestran los valores más altos ($SIRM_{IT}/\chi$). De acuerdo con los criterios establecidos por los autores, los suelos se encuentran en el umbral de las Mgt, Ti(Mgt) principalmente.

A partir del diagrama $HIRM_{300}$ vs S_{300} (**Figura 33d**), es de utilidad ya que en éste se refleja la dispersión de coercitividades/dureza magnética. Con éste, se puede inferir la posible distribución semi cualitativa del espectro de minerales de alta coercitividad sobre aquellos de media y baja coercitividad (*Yamazaki e Ikahara, 2012; Su et al., 2015*). Los bajos valores en S se asocian con minerales magnéticos duros ó de alta coercitividad (Hmt y Gth p.ej.) mientras que los valores altos (~ 1) se interpretan como granos magnéticos suaves y/ó de baja coercitividad (p.ej., Mgt), de acuerdo a diversos reportes previos (*Robinson, 1986, Bloemendal y Liu, 2005; Su et al., 2012*). En el caso de $HIRM_{300}$ los valores altos se interpretan como indicadores de la presencia de Hmt, mientras que los valores bajos se asocian con Gth (*Liu et al., 2013*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (VT)

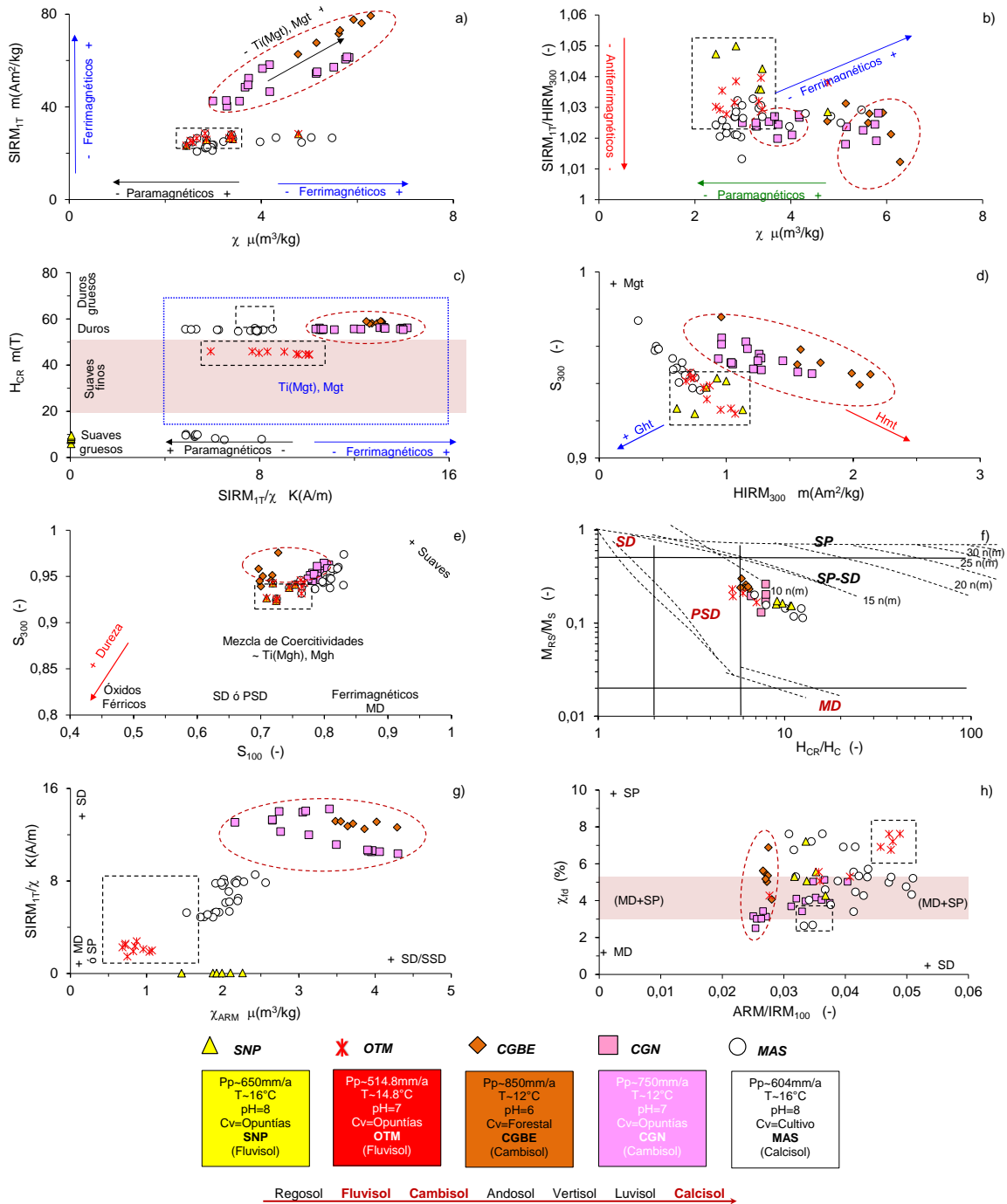


Figura 33.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos estudiados en el valle de Teotihuacán (VT). La figura consiste de diagramas que muestran la dispersión/interacción entre una selección de parámetros magnéticos analizados para los suelos de la región 1. Los perfiles CGBE y CGN son Cambisoles (líneas discontinuas de color rojo, *ovalos*), MAS, es un Calcisol, mientras que SNP y OTM son Fluvisoles (líneas discontinuas de color negro, *rectángulo*) respectivamente. En la parte inferior de la figura se muestran algunas de las características ambientales bajo las que se están desarrollando los suelos, y de forma esquemática se representa el grado evolutivo de cada perfil (color rojo), con respecto al resto de los suelos analizados en esta investigación (color negro). El recuadro de color azul con línea discontinua (Figura c) denota la presencia de Ti(Mgt), Mgt. Los diagramas se construyen e interpretan a partir de diversos trabajos previos (Thompson y Oldfield, 1986; Robison, 1986; Stockhausen y Thuoveny, 1999; Dunlop, 2002; Lu Sh., et al 2008; Liu et al 2012, etc).

De acuerdo con los resultados, los suelos se pueden separar en dos grupos de acuerdo con la distribución que éstos muestran. Los perfiles CGBE y CGN presentan una tendencia a relacionarse de manera inversa, con una pendiente más suave y una mayor dispersión a los parámetros magnéticos. CGN tiene valores más altos de S_{300} y bajos de $HIRM_{300}$, mientras que en CGBE ocurre lo contrario, respectivamente. El segundo grupo, comprende al resto de los suelos, que aunque muestran también una tendencia inversa, la agrupación/distribución de los suelos es relativamente más compacta para cada suelo. MAS posee los valores más bajos de $HIRM_{300}$ y los más altos de S , mientras que los demás perfiles (SNP y OTM) poseen valores más altos de $HIRM_{300}$.

Por medio del diagrama S_{100} vs S_{300} (**Figura 33e**), se busca poder establecer la posible relación entre el espectro de coercitividades de los suelos con los dominios magnéticos que componen a cada suelo (*Thompson y Oldfield, 1986; Krivier y Passier, 2001; Evans y Heller, 2003*). A partir de este esquema se infiere la concentración de los minerales magnéticos duros ($\sim 80\% \leq S$) para el cociente S_{300} (*Bloemendal et al., 1992*), mientras que en el caso de S_{100} , éste presenta más una dependencia del tipo de dominio magnético y la dureza (*p.ej., Stober y Thompson, 1979; Sangode et al., 2008*). Sobre una diagonal, en el extremo derecho se ubican en los granos de baja coercitividad, mientras que en el extremo opuesto, con los valores más bajos hacia el origen la coercitividad ó dureza se incrementa, siendo S_{100} también influenciado por el tipo de dominio magnético.

En el caso del diagrama de Day que relaciona los parámetros H_{CR}/H_C vs M_{RS}/M_S (**Figura 33f**), se pretende comparar los cocientes entre las magnetizaciones y coercitividades para poder establecer una relación entre el tamaño de los dominios magnéticos que están presentes en el suelo. De acuerdo con Day y colaboradores (*1977*) divide el diagrama en tres regiones principales. En el extremo superior izquierdo del gráfico se ubican los granos finos (SD), mientras que en el extremo inferior derecho se encuentran los tamaños de grano más gruesos (MD). Posteriormente, *Dunlop (2002)* postula nuevos límites para el esquema, e incorpora la mezcla de dominios magnéticos.

Los resultados muestran que los suelos se ordenan sobre una diagonal que relaciona a los cocientes de manera inversa, en donde OTM y CGBE se encuentran próximos al límite PSD propuesto por Day, con valores constantes en el cociente entre magnetizaciones y bajos para las coercitividades, siendo MAS el suelo que se ubica en el extremo opuesto. El resto de los suelos están en regiones medias con valores entre estos dos extremos. De acuerdo con la distribución de la mayoría de las muestras analizadas de los suelos en el diagrama, éstas se localizan en la región que

denota, en su mayoría la mezcla de granos PSD y SP-SD de acuerdo con el criterio de *Dunlop (2002)*.

La implementación de un diagrama que relacione los parámetros χ_{ARM} vs $SIRM_{IT}/\chi$ (**Figura 33g**), es para establecer la interacción y distribución de los dominios magnéticos que integran a cada suelo a partir del análisis conjunto de estos. Al normalizar la ARM por un campo aplicado, se discrimina el posible aporte de la concentración (paramagnéticos, p.ej.,) sobre los granos finos, incluso dentro de una mezcla de minerales (*Wang et al., 2010; Liu et al., 2012*). Al normalizar la magnetización de saturación por la susceptibilidad se infiere la contribución de ferrimagnéticos ultrafinos eliminando un posible efecto de viscosidad sobre estos (*Thompson y Oldfield, 1986; Stoner et al., 1996; Liu et al., 2004*).

De acuerdo con el gráfico, los suelos muestran una relación directa de los parámetros magnéticos, ordenándose los suelos sobre una diagonal, con una dispersión de moderada a alta. Los perfiles OTM y SNP tienen los valores más bajos para ambos parámetros, siendo OTM el suelo que posee los valores mínimos con una agrupación compacta del perfil. Los valores más altos corresponden a CGN y CGBE en el extremo superior derecho del gráfico, éste último con los valores máximos. Con valores intermedios y una agrupación relativamente más compacta se encuentra MAS.

El diagrama ARM/IRM_{100} vs $\chi_{fd\%}$ (**Figura 33h**), es de utilidad porque permite inferir la relación entre los parámetros de dominio magnético, especialmente para ver la interacción entre los granos finos y ultrafinos (p.ej., *Dearing, 1999; Geiss, 1999*). A diferencia del diagrama previo, con esta relación se discrimina el efecto posible que puede surgir de la mezcla de minerales magnéticos así como del aporte de diversas concentraciones.

Los resultados indican que los perfiles tienen un ordenamiento relativamente más compacto, sobre una diagonal dentro del esquema, que relaciona de manera inversa a los suelos. Es decir, aunque los suelos reflejan valores homogéneos en el parámetro $\chi_{fd\%}$ para la mayor parte de los suelos ($\chi_{fd\%} \sim 3-5$). CGN tiene los valores bajos para ambos parámetros magnéticos, mientras que en OTM se ubican los máximos. Los suelos CGBE y CGN muestran valores semejantes (ARM/IRM_{100}) pero más altos en $\chi_{fd\%}$ (CGBE > CGN). El resto de los suelos muestran valores intermedios entre estos dos extremos descritos previamente para el cociente, aunque MAS refleja una mayor dispersión en éste.

En resumen, de acuerdo con el análisis conjunto y comparativo entre los diversos parámetros magnéticos en este tipo de diagramas (**Figuras 33a-h**), los resultados son congruentes y

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (VT)

consistentes entre sí. Resaltan la agrupación selectiva de los suelos, misma que refleja la estrecha relación que existe entre la mineralogía magnética de cada suelo con su pedogénesis. De manera general, los suelos en estos esquemas se separan en dos subgrupos: 1) CGBE y CGN, ambos Cambisoles, y 2) MAS (Calcisol), SNP y OTM, ambos Fluvisoles. La distribución de los suelos relaciona directamente a éstos con sus parámetros χ vs $SIRM_{IT}$, e inversamente en χ vs $SIRM_{IT}/HIRM_{300}$. Ambos gráficos son indicadores de una mezcla de granos (ferri/antiferri)-magnéticos (**Figuras 33a-b**). Los Cambisoles, bajo una mayor humedad y relativa menor temperatura ($750\text{mm/a} \leq \text{PP}$, $T \sim 12^\circ\text{C}$) tienen una mayor concentración de ferrimagnéticos, $Ti(\text{Mgt})$, Ti , Mgt y Hmt , lo que es congruente con las curvas k vs T (**Figuras 13a-d**), las de adquisición de IRM (**Figuras 14a-e**) y los valores registrados en perfiles magnéticos correspondientes para cada suelo (**Figuras 15, 16, Tabla 8, p.ej.,**). La disminución en la contribución de los minerales de baja coercitividad, en el resto de los suelos (MAS, SNP, OTM), con una precipitación menor y un aumento sutil en la temperatura ($\text{PP} \leq 604\text{mm/a}$, $T \sim 15/16^\circ\text{C}$), se observa adicionalmente en la gráfica $SIRM_{IT}/\chi$ vs H_{CR} (**Figura 33c**). De forma conjunta los perfiles de dureza magnética de los suelos (**Figuras 15 a 19 k-p**) y los diagramas $HIRM_{300}$ vs S_{300} (**Figura 33d**) y S_{100} vs S_{300} (**Figura 33e**) además de señalar la presencia de $Ti(\text{Mgh})$ - Mgh , consistente con el grado de reversibilidad (k vs T), también sugieren el cambio en la composición y concentración de la mineralogía magnética dura (Hmt y/o Gth) en los suelos (**Figura 13a-e**). La concentración de Gth es relativamente más abundante en el Calcisol y los Fluvisoles, mientras que en los Cambisoles, la $Ti(\text{Mgh})$ - Mgh , Hmt es mayor. De acuerdo con el diagrama de Day, los suelos muestran la mezcla de dominios magnéticos controlada por granos SP y SD, próximos a su límite con los PSD. La distribución de los suelos en los diagramas χ_{ARM} vs $SIRM_{IT}/\chi$ y ARM/IRM_{100} vs $\chi_{fd\%}$ (**Figuras 33g,h**) muestran de manera generalizada una agrupación de los suelos en el que los Cambisoles (CGBE) contiene una relativa mayor concentración de granos SD y SP, mientras que CGN hay una mayor concentración de granos MD y una disminución de SP con respecto a CGBE. Por el contrario los Fluvisoles (SNP y OTM), presentan un decremento de SD con respecto a los Cambisoles (**p.ej., Figura 33g**).

6.1.7 Grado de Pedogenesis y su relación con los parámetros magnéticos

Se puede observar que la variabilidad de los parámetros magnéticos está en función al grado de pedogénesis de cada perfil. Es decir, los parámetros magnéticos muestran una estrecha relación con las condiciones ambientales bajo las que se desarrolla cada perfil (humedad, temperatura, p.ej.), su grado de evolución fundamental y los procesos pedogenéticos (bioquímicos) que controlan y regulan la composición de los minerales magnéticos de cada suelo, su distribución y propiedades.

Los resultados indican que la mineralogía magnética en los suelos de esta región es relativamente similar, con un predominio de las Ti(Mgt)-Mgt con bajo y variable contenido de Ti como la principal fase magnética que prevalece en los suelos. Se observa que hay ligeras diferencias que se relacionan con otros minerales magnéticos con coercitividades variables, como son las Ti(Mgh)-Mgh, Hmt y Gth aunque en menor proporción todas éstas, así como probablemente el contenido de otras impurezas/cationes Δ (Al, Ti, p.ej.), así como con la contribución de materiales paramagnéticos (ferromagnesianos) y/o diamagnéticos (M.O., Qz), que también contribuyen con las variaciones que se registran en los perfiles magnéticos de cada suelo.

De acuerdo con la tendencia que se presentan en sus perfiles magnéticos, los suelos estudiados en esta región pueden agruparse en: a) aquellos que muestran un relativo aumento magnético superficial (CGN, OTM), y b) aquellos que no lo tienen (CGBE, MAS, SNP). La distribución de los suelos en los diagramas de interacción entre parámetros magnéticos resalta una agrupación selectiva de éstos, que en general muestran un comportamiento magnético que varía entre dos extremos: 1) los Cambisoles (CGBE y CGN), que tienen una mayor concentración de partículas ferimagnéticas (**p.ej., Figuras a**), y 2) los Fluvisoles con una menor concentración y un relativo mayor tamaño de partícula (Fluvisoles SNP y OTM). Entre estos dos extremos se encuentra el Calcisol (MAS), en el cual, a medida que se incrementa la concentración, disminuye el contenido de partículas finas.

Los suelos con desarrollo moderado (CGBE, CGN), aunque tienen una edad estimada de 6,000 años, y que muestran la misma etapa de evolución pedológica fundamental (ambos Cambisoles), presentan propiedades magnéticas ligeramente diferentes.

En el caso del perfil CGBE, desarrollado bajo una mayor humedad y cubierta vegetal, registra la mayor concentración tanto de Ti(Mgt-Mgh) como de Hmt y Gth (**Figuras 34a-d**) así como una mezcla de dominios magnéticos, en donde existen abundantes partículas de dominio SD,

con cantidades moderadas de MD, así como bajas concentraciones de SP (**Figuras 34f-h**). Las concentraciones más altas y gruesas se presentan en el horizonte Bw. La disminución de la concentración de minerales ferrimagnéticos y de los granos SP en la parte superficial puede estar relacionado con un rápido lavado del material con una incipiente tasa de eluviación-iluviación, que son controlados por las condiciones de humedad, la estabilidad del sitio (ambiente protegido por vegetación forestal), el buen drenaje, la textura y el alto contenido de la fracción limo. Esto permite que en la parte baja del suelo, se presente la zona de mayor concentración y alteración de minerales, formándose óxidos de hierro, en donde coexisten los minerales magnéticamente suaves y duros.

Por otra parte, las partículas magnéticas en la superficie, son sometidas a procesos de intemperismo durante la descomposición de la materia orgánica, la cual puede actuar como un agente reductor. Esto contribuye con la transformación de los minerales magnéticos que actúa preferencialmente en los granos SP y que resulta en un aumento neto en el tamaño de partícula magnética. El alto valor del índice limo/arcilla (L/A) sugiere una relativa estabilidad del suelo acorde con la densa cubierta vegetal que protege al suelo (**Tabla 5**). La mayor precipitación en la zona (respecto al resto de los suelos), el desarrollo moderado del suelo y la cantidad de minerales magnéticos duros (Hmt p.ej.) que es más abundante en la parte superficial del suelo (relación directa entre el espectro de coercitividad, el color del suelo p.ej.) sugieren que existe una incipiente alteración del perfil aunque ésta ha sido intensa.

En el perfil CGN la mineralogía magnética es similar a la que se presenta en CGBE, aunque tiene una menor concentración de ferrimagnéticos, en mezclas de tamaños MD y SP, con un ligero aumento de SD con respecto al otro Cambisol. A diferencia de CGBE, en este perfil (CGN) la mayor concentración magnética así como un ligero engrosamiento en el tamaño de partícula está dentro de los horizontes Ap y Ah. En el horizonte AB hay una disminución en la concentración, con un ligero aumento de partículas SP. Aunque los valores de Feo y Fed reportados en otros trabajos son similares en el perfil, el cociente Feo/Fed indica que en el horizonte Ap es bajo el intemperismo (**Tabla 5**), de tal manera que los minerales litogénicos permanecen inalterados. Las observaciones de *Cabadas* (2004) apoyan esta interpretación, ya que en el horizonte Ap existe un aumento en el contenido de ferromagnesianos (~paramagnéticos), en relación con el resto del perfil. De acuerdo con el índice L/A, el suelo tiene, en general, un grado de alteración moderado. Esto coincide con un posible, suave y gradual cambio en los minerales de alta coercitividad (Hmt-Gth), siendo mayor el contenido de ésta última hacia la parte baja del suelo, donde previamente se ha considerado que el suelo se ha sometido a condiciones redox como resultado de una pedogénesis de mayor humedad

(Cabadas, 2007), lo que favorece las condiciones para que el suelo contenga una mayor concentración de Gth con respecto a la Hmt.

A diferencia de lo que sucede en las secuencias de loess-paleosuelos, que registran un aumento en la parte superficial (χ), originado por el incremento de minerales ferrimagnéticos y antiferrimagnéticos de tamaño SP a SD, en CGN el realce observado se debe a un aumento en el tamaño de partícula, por lo que en este caso no es resultado de la neoformación de minerales magnéticos.

Un posible aspecto pedológico/ambiental sobre el origen de este incremento magnético se asocia con los procesos de incorporación de nuevos materiales volcánicos en la superficie (posiblemente ceniza que cayó principalmente en esta superficie y que se mezcló con los primeros centímetros del horizonte Ah), los cuales contribuyen fuertemente a incrementar la señal. El alto contenido de arena en Ap (50%) marca claramente esta discontinuidad. Otros factores que estarían regulando dicho aumento es el tipo de material parental así como la proporción y distribución de los dominios magnéticos que componen al suelo. Aunque magnéticamente la composición de la mineralogía magnética es semejante en todos los suelos, una probable causa del aumento magnético en los perfiles con la misma evolución, podría ser el contenido de Ti que influye en la concentración y distribución de las partículas ferrimagnéticas, aún a pesar de que en los horizontes superficiales puede existir una mayor abundancia relativa de los granos magnéticamente duros.

De esta forma, las diferencias en las propiedades magnéticas de los Cambisoles se asocian con el aporte de materiales alóctonos en la superficie del perfil (CGN), así como con la modificación de la cubierta vegetal (ΔC_v , bosque de encino en CGBE a cultivos de *Opuntia* en CGN). Este cambio en el uso de suelo repercute en el contenido y tipo de materia orgánica, así como en los procesos relacionados con su humificación y mineralización (Martín y Hardier, 1986), que se aprecia claramente en los contenidos de carbono orgánico, los cuales son del 5.5% para el horizonte Ah en CGBE y de 1.6% para CGN (Tabla 5). Además, el valor del isótopo estable de carbono ($\delta^{13}C$) en Cerro Gordo documenta una firma de -20%, que no es diferente para un suelo bajo vegetación forestal (Lounejeva et al., 2006). El cambio en la cubierta vegetal modifica el pH del suelo, aspecto que pueden influir en el tipo, abundancia y movilidad de Fe libre en el perfil (Robert y Chenu, Shoji, 2003; Porta y Lopez, 1994), y la humedad del suelo para actuar como un regulador de las tasas de interacción de los procesos pedogenéticos (Kassim et al., 1982). Estos factores contribuyen con la transformación de la mineralogía magnética (Schwertmann, 1988; Hu y Liu, 2003; Liu et al., 2009). Evidencia de esto, puede ser la relación inversa que existe entre el pH

bajo del suelo y la alta concentración de ferrimagnéticos, siendo mayor ésta para el perfil CGBE, en donde las fases minerales estables protegidas por la materia orgánica, se transforman *in situ* enriqueciendo el suelo con la neoformación de óxidos de hierro.

Aunque CGN tiene el mismo grado de evolución que CGBE, los cambios de vegetación, y la estabilidad (aporte de materiales en esta posición de la ladera) influyen en el desarrollo del suelo, así como en la distribución de los minerales magnéticos.

En MAS, los valores moderados susceptibilidad, bajos en $SIRM_{1T}$ y $HIRM_{300}$, así como los altos valores en S_{300} (**Figuras 34a-b, d**) sugieren que los minerales magnéticos están dominados por $Ti(Mg-Mgh)$ que están mezclados con otros minerales paramagnéticos (**Figura 34a,c**). La distribución de los dominios magnéticos es heterogénea. Está controlada por partículas MD, con un contenido ligeramente mayor de granos SD (Ap), así como de SD y SP en el fondo del perfil. La relación L/A del suelo refleja que éste tiene un grado de alteración relativamente moderado. De acuerdo con el cociente Feo/Fed el horizonte Ap tiene la menor alteración pedogenética del perfil (**Tabla 5**). *Cabadas (2004)* señala que en este horizonte se presenta la incorporación de material alóctono, heterogéneo, el cual incluye suelos erosionados y redepositados. Los parámetros magnéticos en MAS registran una concentración de ferrimagnéticos intermedia entre los perfiles de menor desarrollo (Fluvisoles) y los de moderado desarrollo (Cambisoles). Esto pareciera contradictorio con el grado desarrollo que tienen los suelos, ya que MAS es el suelo con mayor evolución y aparentemente más antiguo que los Cambisoles, dada la edad del material subyacente, fechado en $13,358 \pm 140$ años (*McClung et al., 2003*). Sin embargo, esta edad parece ser mucho más antigua que la del suelo. Al respecto, *Pustavoitov (2010, comunicación personal)* fechó los carbonatos contenidos en Bk y obtuvo una edad de 3900 años. La precipitación de los carbonatos ocurre en fases posteriores a la formación del horizonte B, por lo que se asume que la formación del suelo inicia antes (*Cabadas, 2007, p.ej.,*) De acuerdo a los fechamientos de *Sedov y colaboradores, (2009)*, se considera que la edad de un Fluvisol calcárico, que conforma la cubierta edáfica en Tepexpan (a 15 km de la zona de estudio), es de 5,395 años.

Dada esta estimación, se puede suponer que la edad del Calcisol de Maseca es similar a la de los Cambisoles (6,500 años), lo que es congruente con las inferencias que se pueden realizar a partir del registro del color del suelo p.ej.

Las diferencias en las propiedades magnéticas entre los Cambisoles y el Calcisol se deben a las condiciones ambientales marcadamente diferentes para ambas localidades, ya que en las mayores elevaciones (cerro Gordo) éstas son más húmedas y ligeramente más frías con respecto a la

parte baja del valle (**Figura 3, Tabla 5**). De hecho, los Calcisoles representan fases evolutivas diferentes a la de los Cambisoles (menos evolucionados), los cuales requieren de mayor humedad para la alteración de minerales primarios, mientras que los Calcisoles se forman en regiones con mayor evapotranspiración. Aunque no se tienen datos concretos por la falta de las estaciones meteorológicas, la evapotranspiración en el fondo del valle es mayor (~1.3 veces) que la precipitación. En el Cerro Gordo, *Castilla y Tejero (1983)* documentan una mayor humedad debido a la influencia de la vegetación y el efecto de sombra de montaña que en éste se presenta.

En los perfiles SNP y OTM ambos con evolución incipiente (Fluvisoles), ubicados en la parte baja del valle, y los más jóvenes de los suelos aquí estudiados ($\sim \leq 3000$) muestran también propiedades magnéticas ligeramente diferentes, análogamente a lo que ocurre en los Cambisoles (CGBE, CGN).

En general, ambos perfiles (SNP y OTM) poseen bajas concentraciones de minerales magnéticos en los que dominan Ti(Mgt-Mgh), con cantidades bajas de Hmt y Gth con respecto al resto de los suelos. En SNP coexisten partículas MD con cantidades menores de SD y un escaso contenido de granos SP respectivamente. En OTM la proporción de Hmt-Gth es aún menor que en SNP, con un contenido de partículas SP muy variable.

En el perfil SNP, este suelo, ubicado bajo una posición estable en el lecho de un río antiguo, con una pobre cubierta vegetal (*Opuntia*) temperatura y precipitaciones similares a las del perfil MAS (604mm/a, 16°C), se caracteriza porque en éste predominan las Ti(Mgt)-Ti, Mgt que coexisten con un espectro de coercitividades variable relacionadas con un bajo contenido de Ti(Mgh)-Mgh (comparado con el resto de los suelos) mismo que es mayor en el horizonte C. El perfil muestra una relativa alta concentración de la fracción magnética dura (Gth-Hmt) mayor hacia la parte superficial. El suelo posee un contenido homogéneo de partículas MD a lo largo del perfil, con una concentración moderada de granos de dominio SD que disminuye hacia el fondo del suelo, con un sutil aumento relativo de SP en la parte superficial. La composición de la mineralogía magnética dentro del suelo es homogénea, por lo que la disminución superficial de ferrimagnéticos, inversamente proporcional con el aumento de granos SP, está vinculado con la variación en la composición y concentración de la fracción magnética dura. Esto sugiere una transformación rápida de la mineralogía magnética en la parte superficial. La concentración

más alta de ferrimagnéticos en la parte baja del suelo, con un decremento de las partículas de menor tamaño señala una más lenta alteración del suelo.

En el perfil OTM, desarrollado bajo condiciones ambientales similares a SNP (pobre cubierta vegetal, 514., 14.8°C) la mineralogía magnética es muy semejante a la que existe en SNP, aunque con ligeras variaciones en sus propiedades, lo que está relacionado con el desarrollo del perfil, que está influyendo en la concentración de ferrimagnéticos. Las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt, aunque en bajas concentraciones con respecto a los suelos más evolucionados como en el perfil previo, son las que predominan en el suelo, sin embargo en mayor cantidad relativa con respecto a SNP. El aumento superficial de ferrimagnéticos, inversamente proporcional con el decremento de granos gruesos y partículas paramagnéticas, sugieren una neoformación y alteración (oxidación) de la mineralogía magnética mayor en la parte superficial, lo que se asocia con un sutil aumento de Hmt.

Una diferencia importante que existe entre los Fluvisoles (OTM y SNP) es la ausencia del realce (χ) en SNP, a pesar de ser suelos con la misma evolución, pero con un desarrollo/pedogénesis diferente. Esto puede deberse al tipo de material que se aporta a cada suelo, ya que ambos son formados por la incorporación de materiales aluviales, los cuales pueden transportar partículas de fuentes heterogéneas. Diversos trabajos reportan que estos perfiles contienen rasgos contrastantes. Por un lado tienen minerales volcánicos poco alterados que revelan su bajo grado de desarrollo, con minerales caoliníticos de mayor intemperismo (*Cabadas, 2004; McClung et al., 2003 y 2005; Solleiro et al., 2006; Rivera et al., 2007*). Esto, aunado a la inversión en los fechamientos en SNP (*Rivera et al., 2007*), permite suponer que hay aporte de restos de suelos, erosionados de las partes más altas.

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

6.2 Glacis de Buenavista

6.2.1. Perfil BV

(Andosol, Buenavista)

De acuerdo con los resultados obtenidos (curvas k vs T), la mineralogía magnética del suelo es homogénea, y está compuesta principalmente por $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt (**Figuras 20a,b**). Dichas fases se encuentran coexistiendo con un espectro de minerales de coercitividad variable. Esto se puede establecer a partir de la coloración del suelo, y de acuerdo con el comportamiento (dm/dH) registrado en sus curvas de adquisición de IRM (**Figura 21a**), la variabilidad (k vs T) y su grado de reversibilidad (GR), parámetros de concentración (**Figuras 22a-f**) y dureza (**Figuras 22k-p**). A partir de éstos, se infiere la coexistencia de fases como $Ti(Mgh)$ - Mgh , Gth y Hmt , aunque todas ellas en menor proporción, con una distribución diferente (*Cornell y Schwertmann, 2000; France y Oldfield, 2000; Jelenska et al., 2010; Carracho y Vilallain, 2011*).

En los horizontes Ah y AB, existe una relativa mayor irreversibilidad ($\sim |GR \leq 16|$) en k vs T , que denota una mayor concentración de minerales meta estables $Ti(Mgh)$ - Mgh y Hmt que forman parte de los minerales que se encuentran mezclados con la $Ti(Mgt)$ - Mgt (**Figura 20a**). La presaturación a campos bajos ($\sim 300 \geq H$) sugieren la presencia de Mgt , que coexiste con alguna componente de mayor dureza que se asocia con el sutil incremento a campos más altos (**Figura 21a**). Los cambios en las curvas (k vs. T) asociados con el desplazamiento ($\sim T_c$'s) corrobora su presencia, la cual también contribuye al espectro de coercitividades. La coloración del suelo (umbral $\sim 10YR$, **Tabla 6**) puede ser indicativo de la presencia de Gth (*Torrent et al., 1980; Ovalles et al., 2003; Saffiudin et al., 2011*), que también se infiere a partir del sutil cambio a bajas temperaturas ($\sim T < 120^\circ C$) por diversos autores (*Dunlop y Ozdemir, 1997; Kasama et al., 2004*), y que suele coexistir y/o ser una fase precursora de Mgh (*O'Really, 1984; Liu et al., 2005*) como también lo es la Mgt (*Barron y Torrent, 2002; Xie et al., 2009*). En ese sentido, la presencia de impurezas en el suelo como cationes/elementos (Al y Ti, M.O. \sim coloración del suelo) están presentes en el suelo (*Pan et al., 2006; Jordanova et al., 2010; Sosa y Alvarado, 2010*) contribuyen con las diferentes tasas diferidas (T_c) a partir del cual se infiere un aporte de $Ti(Mgt)_{-Ti}$ sobre el contenido de Mgt (*Dillon y Blei, 2006*). La presencia de Hmt meta estable y estable se deduce a partir de los cambios (T_c 's) asociados por la oxidación parcial a bajas temperaturas de $Ti(Mgt)$ - Mgt (*Deng et al., 2001*, entre otros).

Por otro lado, en el caso de los parámetros de concentración (**Figuras 20**), estos indican de manera general, que las partículas ferrimagnéticas dentro de estos horizontes son lo que más abundan (**Tabla 12a**). Los valores homogéneos que se observan en χ y $\Delta\chi$ (**Figuras 22a,b**) sugieren una relativa concentración homogénea de paramagnéticos, excepto en la parte media del horizonte Ah, donde éstos decrecen suavemente. La disminución en la adquisición de las remanencias (horizonte Ah), es consistente con el incremento de coercitividad sugerido por los parámetros de dureza magnética (**Figuras 22d,e** y **Figuras 22k-p**), mientras que en el horizonte AB, la concentración de ferrimagnéticos aumenta (**Figura 22g**). Los parámetros de dominio magnético señalan la presencia selectiva de mezclas de granos. Es decir, de acuerdo con los altos valores $\chi_{fd\%}$ ($6\% <$) que se observan en la parte superficial del horizonte Ah reflejan un alto contenido de granos SP, mismos que predominan en el suelo (*Dearing, 1999*). Éstos coexisten con granos SD próximos a sus límites con SD~SD/PSD y SD/SSD, aumentado de tamaño hacia su transición con el horizonte AB (decremento gradual de ARM/IRM₁₀₀, χ_{ARM} y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$), y decrecen suavemente en AB, de forma directa con la concentración de ferrimagnéticos. Liu y colaboradores (*2007*) así como Hao y colaboradores (*2009*), señalan que el factor L es un criterio para establecer si los cocientes HIRM y S son indicadores de partículas de alta coercitividad. De acuerdo con los autores y en reportes posteriores, estos parámetros reflejan la presencia de Hmt (altos valores de L, HIRM), que puede ser asociado con una pedogénesis intensa, al registrar un comportamiento inversamente proporcional los perfiles H_{CR} y HIRM (*Liu C et al., 2012*; entre otros). Estos perfiles magnéticos también sugieren la presencia de minerales de coercitividad bajas (Mgt, $S > 0.9$) y medias (Mgh, $S_{100} \sim \leq 0.8$).

En el horizonte Bw, el cambio la mineralogía magnética es muy semejante a la que se registra en los horizontes superficiales descritos previamente, siendo las Ti(Mgt)_{Ti}, Mgt los minerales magnéticos más abundantes (**Figura 20b**). Las curvas k vs T muestran una relativa mayor reversibilidad ($GR \sim |14|$) que indican un posible cambio en la concentración y composición de los minerales magnéticos duros. Esto se relaciona con un mayor grado de intemperismo, al registrar un cambio de coloración (YR~7.5), con respecto a los horizontes A. Los incrementos graduales de χ y $\Delta\chi$ (**Figuras 22a,b**) son consistentes con el aumento en las remanencias (NRM, ARM y SIRM_{IT}), que corroboran el mayor contenido de ferrimagnéticos (**Figuras 22c-e**). Éstos presentan una estrecha relación con el contenido de granos de dominio SP y SD, los más abundantes en el horizonte, que tienden a incrementarse hacia el fondo del perfil. Los relativos bajos valores de ARM/IRM₁₀₀, χ_{ARM} y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ en la parte superior del horizonte, señalan partículas de mayor

tamaño (**Figuras 22h-j**). La variabilidad de H_{CR} sugiere cambios en la composición y distribución de los minerales magnéticos duros. Los comportamientos opuestos entre los cocientes de HIRM y S_{100} indican que la presencia de Hmt (L), por una pedogénesis intensa en especial en la parte superior, mientras que en el fondo hay mayor contenido de Gth (*Liu C., et al., 2012; Liu et al., 2013*). De acuerdo con Anderson (2008), el comportamiento opuesto presente entre los cocientes de HIRM es un registro de la presencia de Mgt dura.

6.2.2. Perfil AHLV

(Luvisol, Ahuatenco)

A diferencia del perfil previo, este suelo muestra una mineralogía más heterogénea de acuerdo con el comportamiento registrado en sus curvas k vs T (**Figura 20a,b**) y su grado de irreversibilidad, las curvas de adquisición de IRM (**Figura 21b**) y la coloración del suelo (**Tabla 6**), que en su conjunto muestran que las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt son los minerales más abundantes (p.ej., *Ovalles, 2003; Deng et al., 2004; Balsam et al., 2011*). Sin embargo, éstas se encuentran mezcladas con un espectro variable de coercitividads que sugieren una distribución y concentración diferente de otras fases meta estables como las $Ti(Mgh)$ -Mgh, Hmt, Gth (**Tabla 12b**), así como el posible aporte diferido de impurezas (cationes $\Delta Ti/Al$, paramagnéticos, etc). Éstas contribuyen tanto a las variaciones de los parámetros de composición arriba citados, como al resto de los perfiles magnéticos p.ej., concentración (**Figuras 23a-e**) y dureza (**Figuras 23g-j**). El mayor grado de irreversibilidad ($GR \sim |45|$) y decremento gradual de k vs T dentro del horizonte Ah, sugieren un mayor aporte de $Ti(Mgh)/Mgh$ con un probable y relativo aumento en el contenido de Ti y otras impurezas, así como de Hmt que coexisten con las $Ti(Mgt)/Mgt$ (**Figura 20a**). Esto se corrobora con las curvas de adquisición de IRM (decrecen $\sim 50\%$ respecto a BV) así como la pre-saturación a campos bajos ($H < 200mT$), la pendiente relativamente suave que registran ($400mT < H$), así como la coloración del horizonte (**Tabla 6**). De acuerdo con los sutiles valores bajos y constantes de χ , $\Delta\chi$ y NRM, en el horizonte existe un bajo contenido de minerales magnéticos, con un aporte homogéneo de paramagnéticos (**Figuras 23a-c**). Lo que predominan son las partículas ferrimagnéticas, mismas que presentan un ligero decremento en la parte baja del horizonte, de acuerdo con el registro de las remanencias (**Figuras 23d,e**). Los parámetros de dominio magnéticos (**Figuras 23 f-j**), los suelos muestran de forma general, una mezcla de partículas $(SP+SD) \sim MDs$ (*Thompson y Oldfield, 1986*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (GB)

Tabla 12a.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de BV.

Perfil BV Andosol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
Ah	Ti(Mg) ₀₋₁₀ TL Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (Arc ^s AN ^s , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo, aumenta χ, Δχ ~ cte., ARM, SIRM _{TR} ~ decrecen SIRM _{TR} /χ ~ decrece	SIRM _{TR} /χ ~ aumenta, χ _{0%} ~ alto, aumenta, decrece, ARM/IRM ₁₀₀ ~ decrece, χ _{ARM} , χ _{ARM} /SIRM _{TR} decrecen	H _{CR} > 50mT, ~ L ~ cte., aumenta, HIRM ~ variable, S ~ variable, decrece
AB	Ti(Mg) ₀₋₁₀ TL Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (Arc ^s AN ^s , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ cte., χ, SIRM _{TR} /χ ~ aumentan ARM ~ SIRM _{TR} , aumentan	SIRM _{TR} /χ ~ aumenta, χ _{0%} ~ decrece, ARM/IRM ₁₀₀ ~ aumenta, decrece, χ _{ARM} , χ _{ARM} /SIRM _{TR} aumentan	H _{CR} > 50mT, ~ decrece, HIRM ~ aumentan, L ~ decrece, S ₁₀₀ ~ decrece, S ₃₀₀ ~ cte., aumenta
Bw	Ti(Mg) ₀₋₁₀ TL /Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (Arc ^s AN ^s , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ aumenta χ, Δχ ~ aumentan ARM, SIRM _{TR} ~ aumentan	SIRM _{TR} /χ ~ decrece, χ _{0%} ~ aumenta, ARM/IRM ₁₀₀ ~ aumenta, χ _{ARM} , aumenta y decrece, χ _{ARM} /SIRM _{TR} aumenta, cte.	H _{CR} > 50mT, ~ decrece, HIRM ~ decrecen, L ~ cte., aumenta, S ~ HIRM ⁻¹ , HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₃₀₀ ⁻¹ , HIRM ₃₀₀ ⁻¹ , HIRM _{alto} ~ S ₁₀₀ ⁻¹

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitvidades, p.ej., Gth y/ó Hmt. Mgh. La simbología representa Ti(Mg)₀₋₁₀TL (titanomagnética con poco Ti), Mgt (magnética), Ti(Mg)₀₋₁₀TL (titanomagnética rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomagnética), Mgh(magnética), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), ΔArc^s (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), AN^s (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs.T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

El aumento gradual de $\chi_{fd\%} \geq 5\%$ es indicativo de abundantes granos SP (*Dearing, 1999*), mientras que los registros de ARM/IRM_{100} , χ_{ARM} y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ (**Figuras 23h-j**) sugieren la presencia de partículas SD con una distribución diferente. En la parte superficial del horizonte, hay un sutil aumento de MD (χ_{ARM} bajo) con ligeros decrementos de SP (mínimo $\chi_{fd\%}$) y SD~PSD así como con su límite ~SD/SSD (bajos valores de χ_{ARM} y ARM/IRM_{100}). Por otro lado, el cociente L confirma que el resto de los parámetros de dureza magnética constituyen un registro confiable de minerales de alta coercitividad (*Liu Q., et al., 2007; Quinton, 2011; Su et al., 2015*). Los valores opuestos entre los cocientes HIRM sugieren la presencia de Mgt dura dentro del horizonte (*Anderson, 2008*), mientras que la tendencia inversamente proporcional que se observa entre el cociente S_{100} y $HIRM_{100}$ indican la presencia de Mgh (*Liu et al., 2007; Yamazaki e Ikahara et al., 2012*).

Por otro lado, el horizonte Bt muestra un menor grado de irreversibilidad de las curvas k vs T, ($GR \sim |14|$), lo que sugiere un relativo menor grado de alteración de la mineralogía magnética dentro del horizonte, $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt (fase predominante), en comparación con el horizonte superficial (**Figura 20b**), así como la cantidad de impurezas (*Dilon y Blei, 2006; Sosa y Alvarado, 2010*), lo que resalta la presencia de otros minerales de coercitividades variables. Esto es congruente con la coloración del suelo (~2.5YR), y la curva de adquisición de IRM (**Tabla 6y Figura 21b**, respectivamente) que señalan la presencia de minerales de coercitividad variable como Hmt, y Mgt.

Los bajos valores de NRM (**Figura 23c**) y los decrementos en los extremos del horizonte en χ y $\Delta\chi$ (**Figuras 23a,b**) sugieren un contenido relativamente bajo de minerales de hierro. También hay una moderada concentración de paramagnéticos, misma que se corrobora por los bajos valores de $SIRM_{IT}/\chi$ (**Figura 23f**), siendo los granos ferrimagnéticos los más abundantes y con una distribución similar (ARM , $SIRM_{IT}$) a la que muestran los paramagnéticos. Por otro lado, el comportamiento opuesto entre $SIRM_{IT}/\chi$ y $\chi_{fd\%}$ reflejan la mezcla de granos MD+SP (valores ~ 3-5%, $\chi_{fd\%}$) y (SD+SP)~MDs de acuerdo a $SIRM_{IT}/\chi$ (~ cte.) respectivamente (*Thompson y Oldfield, 1986; Lu Sh et al., 2008*). Lo que predominan son los granos SP (*Dearing, 1999*) que decrecen hacia la parte baja del horizonte a medida que se incrementa el contenido de SD (región media del horizonte) y MD sutilmente. El aumento de SD se refleja también en χ_{ARM} , a una tasa diferente ($\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$). De acuerdo con los parámetros de dureza magnética, en el horizonte hay abundante Hmt dispersa (**Figuras 23k-p**).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (GB)

Tabla 12b.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de AHLV.

Perfil AHLV Luvisol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
Ah	Ti(Mg) ⁵ Ti, Mgt Ti(Mggh), Mgh Hmt Ghh	k vs. T ~ (Arc ^s , A _{TiN} ^s , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ disminuye χ ~ cte., Δχ ~ aumenta ARM, SIRM _{1T} ~ decrecen	SIRM _{1T} /χ ~ cte., χ ₆₀₀ ~ aumenta, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., aumenta, χ _{ARM} , decrece χ _{ARM} /SIRM _{1T} aumenta	H _{CR} > 50mT, ~ decrece, HIRM ~ decrecen, L ~ variable, HIRM ₁₀₀ ~ decrece, HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₃₀₀ ⁻¹ , S ₁₀₀ ~ aumenta, S ₃₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹
Bt	Ti(Mg) ⁵ Ti, Mgt Ti(Mggh), Mgh Hmt Ghh	k vs. T ~ (Arc ^s , A _{TiN} ^s , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo, cte., χ, Δχ ~ aumentan, decrecen ARM, SIRM _{1T} ~ aumentan, decrecen	SIRM _{1T} /χ ~ cte., aumenta, χ ₆₀₀ ~ alto, decrece, decrece, ARM/IRM ₁₀₀ ~ alto, decrece, cte., χ _{ARM} , aumenta χ _{ARM} /SIRM _{1T} disminuye	H _{CR} > 50mT, ~ decrece, L ~ variable, HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₁₀₀ ~ aumenta, HIRM ₁₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹ , S ₃₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹ ,

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna) y su coercitividad o dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Ghh y/ó Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mg)⁵Ti (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mg)⁵Ti (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mggh) (titanomagnetita), Mgh(magnetita), Hmt (Hematita), Ghh (Goethita), Arc^s (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), A_{TiN}^s (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs. T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

6.2.3. Perfil AHVT

(Vertisol, Ahuatenco)

Distinto a lo que ocurre en los perfiles previos (BV y AHLV), este suelo muestra curvas k vs T diferentes que indican una modificación en la composición de la mineralogía magnética (**Figuras 20e,f**). Las curvas sugieren la presencia de $Ti(Mgt)_{+Ti}$, Mgt como la principal fase magnética en el suelo, las cuales se encuentran mezcladas con otras fases como $Ti(Mgh)$ - Mgh , Gth y Hmt , todas ellas en menor concentración y con una distribución distinta dentro del suelo. Además de las curvas k vs T (**Figuras 20e,f**), la coloración del suelo ($\sim 5Y$, **Tabla 6**), los cambios e incrementos (dm/dH) que se registran en las curvas de adquisición (**Figura 21c**), así como las variaciones en los parámetros de concentración (**Figuras 24a-f**) y dureza magnética (**Figuras 24k-p**) contribuyen a corroborar la presencia de los minerales en menor concentración y con un espectro de coercitividad variable (**Tabla 12c**).

Los cambios ($\sim T_c$'s) en las curvas k vs T de los horizontes A_1 y A_2 y su grado de reversibilidad ($GR \sim |15|$) indican la presencia de $Ti(Mgt)_{+Ti}$, Mgt como el principal mineral magnético presente en el suelo. Ésta se encuentra coexistiendo con Gth , Mgt y Hmt , cuyas evidencias de éstas dos últimas fases se pueden inferir a partir de la pre-saturación e incremento abrupto registrado en las curvas de adquisición IRM a campos bajos ($\sim (200-300 > H)$). Los resultados sugieren (ΔT_c 's, GR , etc) que éstas fases son de carácter secundario, producto de la pedogénesis (**Deng et al., 2004; Ozdemir y Dunlop, 2005; Liu C. et al., 2012**). El incremento gradual registrado en el perfil de NRM dentro de los horizontes A, es inversamente proporcional con el decremento de las demás remanencias (**Figuras 24c-e**). Esto indica una baja concentración de minerales magnéticos en la parte superficial del suelo, así como la disminución de granos ferrimagnéticos (los más abundantes en el suelo) hacia el fondo del perfil. La tendencia decreciente de χ y $\Delta\chi$ sugieren la presencia relativamente homogénea de paramagnéticos dentro del horizonte (**Figuras 24a,b**). La similitud de los parámetros $SIRM_{1T}/\chi$ y $\chi_{fd\%}$ indican que en ambos horizontes la cantidad de granos SP es casi nula ($\chi_{fd\%} < 3\%$) resaltando una mayor abundancia de partículas de mayor tamaño, p.ej., MD, (**Dearing, 1999; Lu Sh et al., 2008**). De forma general, el resto de los parámetros asociados con los dominios magnéticos reflejan la presencia de granos SD dentro del horizonte, próximos a sus límites con $\sim SD/PSD$ (ARM/IRM_{100}), así como con $\sim SD/SSD$ (χ_{ARM}), registrando un sutil decremento en el horizonte A_2 , y resaltando un incremento en la concentración de granos gruesos ($\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$). La variabilidad de los perfiles de dureza magnética es consistente con la concentración y composición de la mineralogía magnética de ambos horizontes (**Figuras 24k-p**). El

comportamiento homogéneo del factor L es evidencia de que los cocientes HIRM y S son un registro de la concentración de Hmt, y que su distribución está asociada con la concentración y distribución de Gth y otros minerales de alta y media coercitividad (*Liu Q. et al., 2007; Quinton, 2011; Liu Z et al., 2013; Yamazaki e Ikehara, 2012*).

Liu y colaboradores (*2007*; p.ej.) establecen que los valores opuestos entre los cocientes $HIRM_{100}$ y S_{100} son evidencia de la presencia de Mgh, como sucede dentro de este horizonte, mientras que los altos valores de H_{CR} y HIRM en la parte superficial son indicativo de una mayor concentración de Hmt (*Su et al., 2015*).

Por otro lado, a diferencia de los horizontes A, en el horizonte C existen curvas (k vs T) que reflejan mejor ΔTc 's, (GR~|34|), lo que pueden estar sugiriendo que las $Ti(Mgt)_{+Ti}$, Mgt, abundantes en el suelo son relativamente menor con respecto a los horizontes superficiales y/ó un cambio en el contenido de Ti, aunque éste sigue siendo mayor con respecto al que se presenta en los suelos previos. Estas se encuentran mezcladas con $Ti(Mgh)$ -Mgh, Hmt y Gth, aunque con una distribución y concentración diferente. Esto resulta congruente con la coloración del suelo (~5Y, **Tabla 6**), y la menor remanencia que presentan en la curva de adquisición (**Figura 21d**). De acuerdo con el perfil de NRM (~ constante), el contenido de partículas magnéticas es homogéneo dentro del horizonte (**Figura 24c**), mientras que la disminución gradual hacia la parte baja del horizonte en las remanencias (ARM , $SIRM_{1T}$) indican el decremento de partículas ferrimagnéticas (**Figuras 24d,e**), que son inversamente proporcionales con el incremento de paramagnéticos (bajos valores de χ y $\Delta\chi$). A diferencia de lo que ocurre con los horizontes superficiales, en éste horizonte (C), aunque predominan las partículas MD (bajos valores $\chi_{fd\%} \leq 3\%$), éstos coexisten con un ligero incremento en el contenido de SD (aumento en ARM/IRM_{100} y $\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$), y un sutil decremento de la fracción fina de SD ($\chi_{ARM} \sim$ decrece SSD) en el fondo del horizonte, resaltando la escasa presencia de granos SP (*Dearing, 1999; Wang et al., 2010*). Por otro lado, El suave aumento del cociente L indica la presencia de Hmt (*Liu et al., 2007*). Los decrementos que se registran en los perfiles de H_{CR} y HIRM indican que hacia la parte inferior del suelo hay una disminución en la concentración de Hmt, por lo que la presencia de Gth se debe estar incrementando (*Liu Z et al., 2013*).

Tabla 12c.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de AHVT.

Perfil AHVT Vertisol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
A ₁	Ti(Mgb)-Ti, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_C), ΔT_{NS} , GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo $\Delta \chi$, $SIRM_{1T}/\chi \sim$ decrecen, ARM, $SIRM_{1T} \sim$ disminuyen	$SIRM_{1T}/\chi \sim$ cte., $\chi_{d0\%} \sim$ decrece, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., χ_{ARM} , decrece $\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$, cte., aumenta	$H_{CR} > 50mT$, ~ decrece, HIRM ~ decrecen, L ~ variable, S ~ aumentan, HIRM ₁₀₀ alto ~ S ₁₀₀ bajo
A ₂	Ti(Mgt)+Ti, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_C), ΔT_{NS} , GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ alto χ , $\Delta \chi \sim$ variable ARM, $SIRM_{1T} \sim$ decrecen $SIRM_{1T}/\chi \sim$ bajo	$SIRM_{1T}/\chi \sim$ cte., aumenta, $\chi_{d0\%} \sim$ cte., ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., χ_{ARM} , decrece $\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$, cte.,	$H_{CR} > 50mT$, ~ decrece, HIRM ~ decrecen, L ~ cte., S ~ aumentan, HIRM ₁₀₀ alto ~ S bajo
AC	Ti(Mgb)-Ti, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_C), ΔT_{NS} , GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ cte., χ , $\Delta \chi \sim$ decrece, ARM, $SIRM_{1T} \sim$ decrecen	$SIRM_{1T}/\chi \sim$ aumento, $\chi_{d0\%} \sim$ bajo, ARM/IRM ₁₀₀ ~ aumenta, χ_{ARM} , decrece $\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$, aumenta,	$H_{CR} > 50mT$, ~ decrece, HIRM ~ decrecen, L ~ aumenta, S ~ disminuyen

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/o Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)-Ti (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mgt)_{Ti} (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh(maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), ΔT_C (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), ΔT_{NS} (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs.T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

6.2.4. Perfil SUVT

(Vertisol, Santa Úrsula Noria)

La mineralogía magnética del suelo es similar a la que se observa en el perfil previo (AHVT) y a su vez contrastante con respecto al resto de los perfiles estudiados en esta región 2 (GB). De acuerdo con las curvas k vs T , la mineralogía del suelo es homogénea, y está controlada en su mayoría por la presencia de abundantes $Ti(Mgt)_{+Ti}$, Mgt (**Figura 20g-h**). Éstas se encuentran mezcladas con $Ti(Mgh)-Mgh$, Gth , y Hmt , todas ellas en menor proporción, con un carácter secundario, lo que se infiere por su grado de irreversibilidad, y que es indicativo de la alteración de los minerales magnéticos (*Jelenska et al., 2010, p.ej.,*). Esto se corrobora con la pseudo presaturación que se observa en las curvas de adquisición (**Figura 21d**) y el incremento muestran las curvas ($\sim H=200-400mT$), la coloración del suelo ($\sim 7.5YR$, **Tabla 6**) así como las variaciones en los parámetros de concentración (**Figuras 25 a-f**) y dureza de las partículas magnéticas (**Figuras 25k-p**). Estos sugieren una variación en la composición/concentración de la mineralogía magnética con respecto al perfil previo, así como de su distribución dentro del propio suelo (**Tabla 12d**).

En el horizonte AC_1 , el decremento de NRM refleja una baja concentración de los minerales magnéticos, en donde la disminución de χ , $\Delta\chi$ e incremento de $SIRM_{IT}/\chi$ señalan la presencia de granos paramagnéticos cuya concentración tiende a incrementarse hacia la parte baja del horizonte (**Figuras 25a,b,f**). Esto es congruente con los valores altos hacia la parte superficial del suelo que indican una relativa mayor concentración de ferrimagnéticos en dicha zona, lo que también se corrobora en las curvas de adquisición de IRM (**Figura 21d**) que sugieren la mezcla de minerales de coercitvidades diferentes (*Worm 1999; Jordanova et al., 2011*). De manera general, los bajos valores de $\chi_{fd\%}$ ($\leq 3\%$) resaltan la baja concentración de granos SP, con una mayor abundancia de partículas MD (**Figura 25g**). Éstas se encuentran mezcladas con granos SD, mismas que se infieren a partir de los valores relativamente altos y constantes de los parámetros ARM/IRM_{100} , χ_{ARM} y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ (**Figuras 25h-j**). Por otro lado, de acuerdo con *Liu y colaboradores (2007)*, el cociente L resalta la certeza de los cocientes HIRM y S como registros de minerales de alta coercitividad. El incremento gradual de L , indica que su concentración es mayor hacia la parte inferior del horizonte. Los valores altos de HIRM reflejan que la mayor cantidad de Hmt se ubica en la parte superior del suelo (*Quinton, 2011*), probablemente con un cambio en su composición y/o concentración a Gth en la parte baja del horizonte (*Zeng et al., 2013*). *Anderson (2008)* señala que el comportamiento opuesto registrado en la parte superficial entre los cocientes HIRM es evidencia

de la presencia de Mgt dura, lo cual parece ser consistente con los valores altos registrados en los perfiles de concentración (p.ej., ARM y $SIRM_{1T}$).

Por otro lado, en el horizonte AC₂, la mineralogía magnética predominante son las $Ti(Mgt)_{+Ti}$, Mgt, de acuerdo con las curvas k vs T (**Figura 20h**). Con respecto al horizonte superficial, éste posee probablemente un mayor contenido de impurezas (Ti) lo que contribuye para que su registro k vs T sea más ruidoso, lo que también se refleja en la baja intensidad que se registra en su curva de adquisición de IRM (**Figuras 20g y Figura 21d**). La disminución gradual de las remanencias y el comportamiento relativamente homogéneo de sus perfiles con respecto al horizonte AC₁ reflejan la disminución de ferrimagnéticos, así como la presencia de partículas paramagnéticas con un ligero aumento de éstas en la parte superior del horizonte. Los bajos valores de $\chi_{fd\%}$ ($\leq 3\%$) muestran el predominio de los granos MD (*Dearing, 1999*) que se encuentran mezcladas con granos SD, los que decrecen hacia la parte baja del horizonte (ARM/IRM_{100} , χ_{ARM}), resaltando el escaso contenido de partículas SP (*Zhao y Liu, 2010; Su et al., 2015*). De acuerdo con los parámetros de dureza magnética, en el horizonte existe una mezcla de minerales de coercitividad variable, $L \sim$ constante y espectro de S_{100} p.ej., (*Liu et al., 2007; Quinton, 2011*). De acuerdo con los autores, la presencia de Hmt dentro del horizonte posee una distribución selectiva, siendo sutilmente mayor ésta en la parte superior del horizonte (valores altos de H_{CR} y más bajos de S_{100}). Los valores opuestos entre S_{100} y $HIRM_{100}$, previamente han sido utilizados como un registro de Mgh, lo que ocurre en la parte baja del horizonte.

6.2.5 Relación entre los parámetros magnéticos

De forma análoga a la región previa (VT, **Figura 33**), en ésta también se lleva a cabo la comparación entre parámetros magnéticos en diagramas de dispersión para analizar de manera conjunta la interacción e influencia del ambiente en la mineralogía magnética y sus propiedades de cada suelo de acuerdo con su pedogénesis y grado de evolución (**Figura 34**).

El esquema χ vs $SIRM_{1T}$ (**Figura 34a**), muestra de manera general que los suelos se pueden separar en dos regiones dentro del diagrama: 1) los suelos con un ordenamiento a lo largo de una diagonal que relaciona ambos parámetros magnéticos (\sim directamente proporcional) se encuentran los perfiles SUVT, AHLV y BV, 2) tomando como base los valores más bajos de ambos parámetros de SUVT, junto con AHVT muestran un ordenamiento \sim sobre una horizontal en la parte inferior del diagrama.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (GB)

Tabla 12d. Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de SUVT.

Perfil SUVT Vertisol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
AC ₁	Ti(Mg) _{1-1Ti} , Mgt Hmt Gth	k vs. T ~ (Arc ^s _s A ^{TiN} _s , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo, decrece, χ ₀ , Δχ ~ decrecen, ARM, SIRM _{1T} ~ disminuyen, χ decrece, SIRM _{1T} /χ ₀ aumenta	SIRM _{1T} /χ ~ cte., aumenta, χ ₀ ~ bajo, decrece, ARM/TRM ₁₀₀ ~ alto, cte., χ _{ARM} , alto, cte., χ _{ARM} /SIRM _{1T} , aumenta	H _{CR} > 50mT, ~ aumenta HIRM ~ alto, cte., decrece, HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₃₀₀ ⁻¹ L ~ cte., S ~ decrecen
AC ₂	Ti(Mg) _{1-1Ti} , Mgt Ti(Mg) ₁ , Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (Arc ^s _s A ^{TiN} _s , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ bajo, χ ₀ , Δχ ~ cte., ARM, SIRM _{1T} ~ cte., SIRM _{1T} ~ cte.,	SIRM _{1T} /χ ~ cte., χ ₀ ~ bajo, decrece, ARM/TRM ₁₀₀ ~ decrece y aumenta, χ _{ARM} , cte., χ _{ARM} /SIRM _{1T} , decrecen, cte., aumentan	H _{CR} > 50mT, ~ aumenta, L ~ variable, cte., HIRM ~ ctes., decrecen, S ~ decrecen

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna) y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitvidades, p.ej., Gth y/ó Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mg)_{1-1Ti} (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mg)₁-Ti (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mg)₁ (titanomagnetita), Mgh(magnetita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), Arc^s (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), A^{TiN}_s (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs. T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

En el extremo superior derecho, BV registra los valores más altos y con mayor dispersión para ambos parámetros dentro de una misma etapa evolutiva. Con valores medios para los dos parámetros se encuentra el perfil AHLV, el cual está más próximo al grupo de suelos que muestran la tendencia a agruparse sobre una horizontal. El perfil AHVT incluye valores homogéneos ~ similares ($SIRM_{1T}$) con SUVT, pero más altos en χ .

Para el diagrama χ vs. $SIRM_{1T}/HIRM_{300}$, se puede observar que los parámetros tienen una relación inversa con una dispersión media entre los suelos sobre una diagonal en la que se ordenan los suelos, con una distribución opuesta a la que se registra en el diagrama anterior (**Figura 34b**). Es decir, SUVT muestra los valores más altos del cociente y más bajos en χ , mientras que en BV ocurre lo contrario, con los valores más bajos para $SIRM_{1T}/HIRM_{300}$ y más altos en χ . Entre estos dos suelos se ubican el resto de los perfiles, en donde AHVT tiene una agrupación compacta y se encuentra más próximo a BV, mientras que AHLV presenta una mayor dispersión.

En el esquema $SIRM_{1T}/\chi$ vs. H_{CR} , los suelos tienen un comportamiento relativamente homogéneo en H_{CR} y en su mayoría sus valores son similares (**Figura 34c**). Presentan una agrupación compacta, excepto en BV donde la dispersión es mayor para ambos parámetros magnéticos. Los valores más bajos para el cociente ($SIRM_{1T}/\chi$) se encuentran en AHVT y SUVT (~ parcial), mientras que los valores más altos se ubican en BV. Con valores entre estos dos extremos están los demás suelos, con SUVT y AHLV más próximos a AHVT en el extremo izquierdo del diagrama.

Por otro lado, a diferencia de las figuras previas, en el esquema $HIRM_{300}$ vs S_{300} , no se puede observar una clara y definida tendencia para relacionar entre sí a los parámetros magnéticos de los suelos como en los gráficos anteriores, aunque en su conjunto éste sí permite resaltar una evidente agrupación selectiva y diferida de los suelos en el diagrama (**Figura 34d**). Con los valores relativamente más bajos en ambos parámetros se encuentran los perfiles AHVT y SUVT (parcial), éste último muestra valores homogéneos de S_{300} , (con una mayor dispersión relativa), en el que una parte del suelo muestra los valores más altos para $HIRM_{300}$ (extremo inferior derecho). En la región superior media del diagrama se encuentra el perfil BV, con una agrupación compacta, así como los valores más altos de S_{300} . Con valores medios y dispersos entre AHVT y BV, se encuentra el perfil AHLV.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (GB)

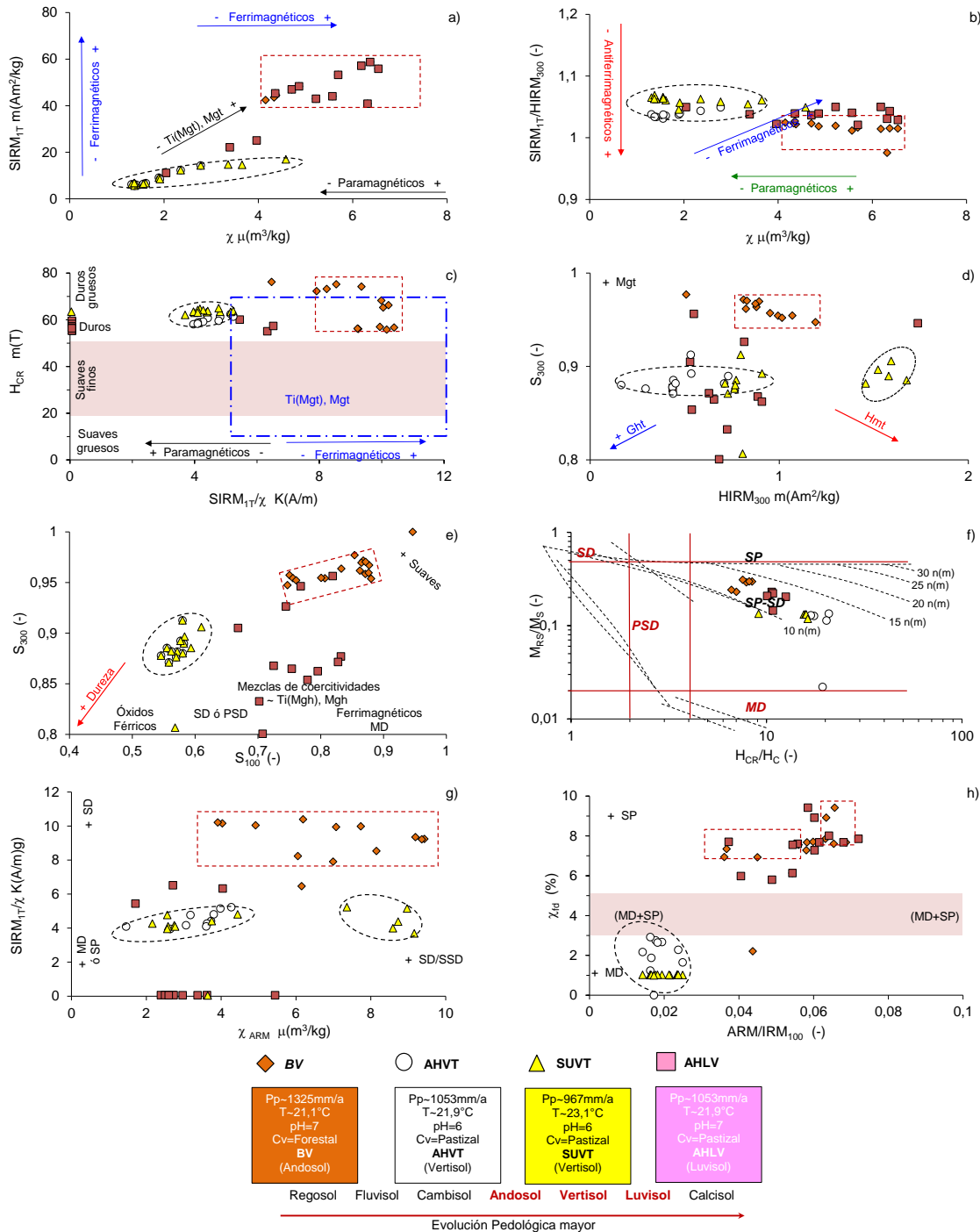


Figura 34.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos estudiados en el Glacis de Buenavista (GB). La figura consiste de diagramas que muestran la dispersión/interacción entre una selección de parámetros magnéticos analizados para los suelos de la región 2. El perfil BV es un Andosol (líneas discontinuas de color rojo, *rectángulo*), AHLV es un Luvisol, mientras que AHVT y SUVT son Vertisoles (líneas discontinuas de color negro, *ovalo*) respectivamente. En la parte inferior de la figura se muestran algunas de las características ambientales bajo las que se están desarrollando los suelos, y de forma esquemática se representa el grado evolutivo de cada perfil (color rojo), con respecto al resto de los suelos analizados en esta investigación (color negro). El recuadro de color azul con línea discontinua (Figura c) denota la presencia de Ti(Mgt), Mgt. Los diagramas se construyen e interpretan a partir de diversos trabajos previos (Thompson y Oldfield, 1986; Robinson, 1986; Stockhausen y Thuoveny, 1999; Dunlop, 2002; Lu Sh., et al 2008; Liu et al 2012, etc).

De manera general, en el gráfico S_{100} vs S_{300} , se puede observar que los suelos tienen una relación directa entre los parámetros magnéticos (**Figura 34e**). En su mayoría, se agrupan sobre una diagonal dentro del esquema, con una dispersión moderada. Sin embargo se presenta una diferenciación de los suelos. Con una distribución compacta y los valores más bajos en ambos parámetros esta SUVT, mientras que en el extremo opuesto con valores más altos y una dispersión moderada se encuentra el perfil BV. En el caso de AHVT, éste presenta valores intermedios con respecto a los suelos previamente descritos, con una relativa mayor dispersión. El perfil AHLV posee la mayor dispersión dentro del diagrama para los dos parámetros magnéticos, con valores de $S_{300} \sim$ semejantes a los de AHVT, aunque más altos en S_{100} .

Por otro lado, de acuerdo con el diagrama de Day (H_{CR}/H_C vs M_{RS}/M_S), los suelos tienden a agruparse de forma compacta dentro del diagrama en cada etapa evolutiva, relacionando de manera inversa los cocientes de magnetización y coercitividad (**Figura 34f**). Los suelos tienden a ubicarse en la región media/superior del diagrama, próximos a la región SP-SD, en donde BV muestra los valores más altos para el cociente entre magnetizaciones y los más bajos para el de remanencias, mientras que en el extremo opuesto, se ubica AHVT. Entre estos dos extremos, se localizan los demás suelos.

En el diagrama χ_{ARM} vs $SIRM_{IT}/\chi$, los suelos presentan una clara diferenciación de los suelos conforme a su grado evolutivo, aunque con una agrupación dispersa de los suelos por evolución (**Figura 34g**). Con valores relativamente semejantes se encuentran SUVT (parcialmente) y AHVT que presentan los valores más bajos de χ_{ARM} y $SIRM_{IT}/\chi$ (especialmente AHVT), aunque SUVT tiene valores ligeramente más altos para el cociente. Agrupados de manera más compacta en χ_{ARM} y con valores similares con AHVT y SUVT se encuentra AHLV. Por el contrario, BV es el suelo que tiene la mayor dispersión dentro del diagrama, con los valores más altos en ambos parámetros magnéticos.

En el caso del diagrama ARM/IRM_{100} vs $\chi_{fd\%}$, los perfiles muestran una relación directa entre los parámetros magnéticos que lo integran, que permite ordenar a los suelos a lo largo de una diagonal, con una dispersión de baja a moderada para cada etapa evolutiva (**Figura 34h**). Los perfiles AHVT y SUVT muestran una agrupación compacta, que en general, refleja los valores más bajos para ambos parámetros, siendo SUVT el suelo que posee los valores más bajos ($\chi_{fd\%}$) mientras que en AHVT son los cocientes. En el extremo opuesto, y con una mayor dispersión, se ubican el resto de los suelos (AHLV y BV), con valores más altos para los dos parámetros.

En resumen, de acuerdo con el estudio conjunto y comparativo de los parámetros magnéticos analizados en este tipo de diagramas (**Figuras 34a-h**), los resultados son congruentes y consistentes entre sí y se complementan con el resto de los parámetros magnéticos estudiados para esta región. Resaltan la agrupación selectiva de los suelos, misma que refleja la estrecha relación que existe entre la mineralogía magnética de cada suelo con su pedogénesis. De manera general, los suelos en estos esquemas se separan de en dos subgrupos: 1) BV (Andosol) y AHLV (Luvisol) y 2) AHVT y SUVT, ambos Vertisoles. El primer subgrupo se caracteriza por tener una mayor concentración de ferrimagnéticos, Ti(Mgt)-Ti, Mgt (**Figuras 34a,c**), con un espectro de coercitividad homogéneo y definido (**Figuras 34b,d,e**). Esto es congruente con sus curvas de χ vs T (**Figuras 20a-d**) y adquisición de IRM (**Figuras 21 a,b**), que reflejan una variación en la composición de los granos magnéticos duros para estos suelos, y sugieren que el contenido de Hmt es relativamente mayor en BV con respecto a AHLV. Ambos suelos muestran una escasa contribución de los granos gruesos, resaltando que en éstos los más abundantes son las partículas SP y SD (**Figuras 34 f-h**).

Por el contrario, el segundo subgrupo también posee una mineralogía compuesta por Ti(Mgt)-Mgt de acuerdo con estos diagramas (**Figuras 34a,c**). Sin embargo registran una menor concentración de ferrimagnéticos comparado con los perfiles BV y AHLV, lo que sugiere un mayor contenido de impurezas asociadas a una mayor cantidad de Ti p.ej., lo que es consistente con sus curvas k vs T (**Figuras 20e-h**). Los diagramas relacionados con la dureza magnética (**Figura 34 d,e**) indican un relativo aumento en la concentración, así como un cambio en la composición de los minerales de alta coercitividad, señalando una mayor contribución relativa de Gth en los Vertisoles.

A diferencia del resto de los suelos del subgrupo 1, estos suelos (Vertisoles) se caracterizan por tener altas concentraciones de granos MD (**Figuras 34g-h**).

6.2.6 Grado de Pedogenesis y su relación con los parámetros magnéticos (GB)

Al igual que en la región previa (VT), se puede observar que la variabilidad de los parámetros magnéticos en los suelos del Glacis también está en función del grado de pedogénesis de cada perfil. Es decir, éstos muestran una estrecha relación con las condiciones ambientales bajo las que se desarrolla cada perfil (p.ej., humedad, temperatura), su grado de evolución fundamental y los procesos pedogenéticos (bioquímicos) que son responsables de controlar y regular la mineralogía magnética de cada suelo, su distribución y propiedades.

Los resultados indican que en general, la mineralogía magnética de los suelos es relativamente similar dentro y entre perfiles. Aunque las Ti(Mgt) son los principales y más abundantes minerales portadores de la magnetización de los suelos, el contenido de Ti es variable (ΔTi). Se observa que las ligeras diferencias en los parámetros magnéticos estudiados se relacionan con la coexistencia con otros minerales magnéticos de coercitividades variables, como son las Ti(Mgh)-Mgh, Hmt y Gth aunque en menor proporción todas éstas, así como probablemente el contenido de otras impurezas/cationes ($\Delta(Al, Ti, p.ej.,)$), la contribución de materiales paramagnéticos (ferromagnesianos) y/o diamagnéticos (M.O., Qz), lo que también contribuyen con las variaciones de los perfiles magnéticos en cada suelo.

De acuerdo con las tendencias que se observan en sus perfiles magnéticos y la relación entre éstos los suelos del Glacis se pueden separar en dos grupos principales: 1) los perfiles BV (Andosol) y AHLV (Luvisol) que carecen de un aumento magnético superficial, y 2) los perfiles AHVT y SUVT, ambos Vertisoles que lo presentan. Esto también influye en la agrupación selectiva de los suelos en los diagramas entre parámetros magnéticos. En general éstos resaltan que los Vertisoles contienen una menor concentración de ferrimagnéticos, mayor contenido de Ti, Ti(Mgt-Mgh)_{+Ti}, y granos de dominio más grueso con respecto al resto de los suelos estudiados (BV y AHLV). Uno de los posibles factores responsables de las variaciones en las propiedades magnéticas de los suelos de esta región son su posición dentro del glacis, lo cual regula las condiciones ambientales (Pp y T) y la pedogénesis de cada suelo (*Gama et al., 2007*).

La composición del Andosol (BV) desarrollado bajo una cubierta forestal, con una precipitación 1325mm/a y temperatura 21.1°C, está dominada por Ti(Mg) con un bajo contenido de Ti en una mezcla de coercitividades relativamente variables, en las que coexisten Hmt y Gth, siendo ligeramente mayor ésta última en el suelo, producto de la alteración e intemperismo del suelo. Las condiciones ambientales (mayor precipitación y densa cubierta vegetal en las localidades estudiadas, p.ej.) contribuyen para que en el suelo se registre una mayor acción del intemperismo químico (moderado) sobre el físico (mecánico) p.ej., (*Figura 3f-f'*), lo que es congruente con la relación L/A (≤ 0.5182) que señala que el suelo presenta un intemperismo moderado y/o una posible baja estabilidad. Estas condiciones favorecen la formación y descomposición de la M.O. cuyo contenido actúa como un agente regulador para condiciones redox, que da por resultado una mayor tasa de *maghemitización* en la parte superficial. La mezcla de tamaños de partículas magnética en el suelo es relativamente homogénea y controlada primordialmente por las partículas magnéticas de dominio SP y SD, sugiriendo que son producto *in situ*, dada su cubierta vegetal que provoca una

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (GB)

relativa tasa de alteración más intensa. No obstante, el predominio de partículas de baja coercitividad indica que éstas son las que controlan la respuesta magnética del perfil. En el horizonte Ah las propiedades magnéticas son influenciadas por el contenido de partículas ferrimagnéticas suaves y duras magnéticamente, con una mezcla en el tamaño de partícula magnética, en el que hay un ligero predominio de las partículas finas. Esto como resultado de la transformación de los minerales magnéticos a través de la descomposición de la M.O. (*Martín y Haider, 1982; Porta y López, 1994*), así como los procesos de oxidación y reducción. En el horizonte AB, se observa que tiene una mayor presencia de ferrimagnéticos, aunque también contiene material magnéticamente duro, éste es enmascarado por las fases suaves. La eluviación incipiente del suelo, así como su relativa mayor estructura contribuyen para que el material comience a acumularse y se altere. En el horizonte Bw, durante la acumulación de las partículas magnéticas eluviadas comienzan a mostrar un mayor grado de eluviación que es relativamente controlada por el desarrollo de una mayor estructura definida del suelo, lo que también influye en la distribución de las partículas magnéticas y de su tamaño de grano.

En el caso del Luvisol (AHLV), desarrollado bajo una pastizal inducido presenta una composición parecida a la que se registra en el Andosol, que aunque también tiene Ti(Mgt-Mgh) mayormente, muestra ligeras variaciones en su contenido de Ti, siendo probablemente mayor éste en la parte superficial. El color del suelo, con respecto a BV, sugiere un mayor contenido de minerales magnéticos duros (Hmt p.ej..) lo cual está relacionado con las variaciones en las coercitividades del suelo, especialmente en el horizonte superficial, donde la Hmt es más abundante con respecto a la Gth. Factores como la posición del perfil, su ubicación y cubierta vegetal modifican el tipo y tasa de formación/descomposición de la materia orgánica, influyendo así en la oxidación y reducción de la mineralogía magnética. Se registra un aumento en la intensidad del intemperismo químico al que se somete el suelo, a pesar del decremento relativo en la humedad al que éste se sujeta debido a la estabilidad del suelo que se refleja también en su relación L/A (*Cabadas, 2007*). En su conjunto, estos aspectos contribuyen con la captación de material alóctono que está siendo transportado y alterado que se deposita e incorpora en el perfil, por lo que se puede considerar que la transformación de los minerales magnéticos y del suelo ha sido intensa y que ha requerido menos tiempo para alcanzar su estado evolucionado de pedogénesis, como han propuesto otros autores previamente (*Escamilla et al., 2002; Díaz, 2008*).

El predominio de partículas SP y SD que controlan la mezcla de granos magnéticos, la baja concentración de ferrimagnéticos (para el grado evolutivo), así como la distribución de su espectro

de coercitvidades son evidencia de información complementaria que sugieren la mezcla ciclos de pedogénesis larga, como se ha propuesto en trabajos previos para este suelo (p.ej., *Cabadas, 2007*).

La diferencia en las propiedades magnéticas entre el Andosol y Luvisol radica en la posición de cada perfil dentro del glacis, que genera un gradiente de precipitación/temperatura diferentes que influye en el contenido de Gth, favoreciendo una distribución preferencial y selectiva de las partículas magnéticas, así como su sensibilidad para transformarse. El cambio en la cubierta vegetal y el drenaje son dos factores que también contribuyen en el tamaño y la distribución de las partículas magnéticas dentro de los suelos. Un posible mecanismo que da origen a la diferencia magnética entre el Andosol y el Luvisol son los cambios en el entorno en el que se están desarrollando ($\Delta(Pp, T, p.ej.,)$) que influye en la cubierta vegetal que protege al suelo y en la tasa y tipo de procesos bioquímicos que actúan sobre la mineralogía del suelo. La cubierta forestal en BV posee una mayor formación/descomposición de la M.O., lo que regula la tasa redox. La alta precipitación de la zona ($\sim Pp \leq 1300$) contribuye al aporte de O_2 en el suelo, y favorece que exista un lavado en la parte superficial del suelo del Fe(II), lo que se ve reflejado que durante la eluviación y lixiviación el suelo registre un incremento de ferrimagnéticos hacia la parte baja del suelo.

En el perfil AHLV, desarrollado bajo una mayor temperatura y menor precipitación relativa, con una cubierta vegetal moderada es sometida a una mayor tasa relativa de producción y descomposición de M.O., lo que favorece la formación de Hmt, sugiriendo los procesos redox como los principales responsables de modificar la mineralogía magnética del suelo.

Por otro lado, el segundo tipo de comportamiento magnético registrado en los perfiles está compuesto por los Vertisoles, ligeramente más ácidos, que muestran una composición homogénea y similar a lo largo de cada perfil, con ligeras diferencias entre sí y contrastantes a su vez con respecto a los suelos previos (BV y AHLV). Lo que predominan en ambos suelos son las $Ti(Mgt)_{+Ti}$, que coexisten con fases de mayor coercitividad (Gth/Hmt), siendo la Hm relativamente más abundante en los horizontes superficiales, mientras que la Gth tiende a ser mayor en la parte baja. También registra un posible mayor aporte de otras impurezas (paramagnéticos, tipo y contenido de arcilla, p.ej.), lo que influye en la concentración de las partículas magnéticas.

En ambos perfiles predominan las bajas concentraciones de ferrimagnéticos con respecto al Andosol y el Luvisol, presentan un realce magnético superficial con una dispersión de las mezclas de tamaños. A diferencia de los perfiles BV y AHLV, estos suelos (AHVT y SUVT) registran una mayor cantidad de Ti y más granos magnéticos de dominio MD. Sin embargo a pesar de la similitud que existe entre las propiedades magnéticas de ambos Vertisoles, se pueden observar suaves

diferencias producto del desarrollo de cada perfil como resultado del grado de pedogénesis diferido del perfil.

En el perfil AHVT el incremento magnético superficial (RMS), asociado con una mezcla de tamaños de grano magnético relativamente homogénea, donde las partículas MD son más abundantes, que se combinan con un bajo contenido de SD, mientras que los SP son escasos. El suelo registra un relativo alto contenido de $Ti(Mgt/Mgh)_{+Ti}$ con una alternancia de Hmt-Gth, en donde la primera es más abundante en la parte superficial del suelo. De acuerdo con las condiciones del entorno (PP y T, p.ej.) y su relación L/A, este suelo presenta un moderado grado de intemperismo químico. En su conjunto, esto sugiere condiciones de una menor humedad relativa con mayor contenido de O_2 superficial, lo que daría lugar a un incremento en la oxidación gradual que daría lugar a las $Ti(Mgh)$ debido al bajo contenido de partículas SP y SD. Esto puede ser evidencia que indique la incorporación de material que es iluviado y traslocado por la expansión y contracción del suelo, y que habría recibido el aporte de material alterado en tres etapas debido a la ubicación del perfil, su pendiente y moderada cubierta vegetal.

El perfil SUVT, aunque también es un Vertisol, presenta un menor desarrollo con ligeras variaciones en sus propiedades magnéticas. De acuerdo con éstas, el perfil tiene la menor concentración de partículas ferrimagnéticas, así como una relativa escasa presencia de Hmt y Gth, lo que sugiere que presentan una mayor concentración de $Ti(Mgt/Mgh)$ con un alto contenido de Ti, incluso mayor que el que se registra en el perfil AHVT. Su mezcla pobre y homogénea de partículas SP y SD refleja un mayor contenido de las partículas MD con respecto a AHVT producto de su menor desarrollo a pesar de registrar la misma evolución pedogenética fundamental. El cambio en la posición y cubierta vegetal contribuyen a controlar las tasas de alteración del perfil, al variar la precipitación y aumentar relativamente la temperatura, el perfil muestra una oxidación/reducción, expansión /contracción y una incorporación de material pre-alterado menor en comparación con respecto al perfil previo. La respuesta magnética del horizonte AC, es controlada fuertemente por su contenido de partículas ferrimagnéticas que se alteran lentamente a partículas magnéticamente duras y que se incorporan al resto del perfil. Esto le imprime un carácter primario e in situ a la respuesta magnética que presenta el suelo.

Una posible explicación de la sutil variación en el comportamiento magnético entre vertisoles es probablemente el entorno en el que se desarrollan éstos. En el caso de SUVT, con una relativa menor precipitación ($\sim 967.2\text{mm/a}$) y mayor temperatura ($\sim 23.1^\circ\text{C}$) con respecto al AHVT ($\sim 1053.9\text{mm/a}$, 21.9), registra una menor concentración de paramagnéticos, la cual es inversamente

proporcional con la concentración de Hmt, misma que resulta mayor en la parte superficial de ambos perfiles ($\sim 2:1$) $Hmt_{SUVT} > Hmt_{AHVT}$, sugiriendo que la concentración de Gth de dominio MD aumenta hacia el fondo de los perfiles.

La diferencia en las propiedades magnéticas de los Vertisoles con respecto a los demás suelos (BV y AHLV) se debe principalmente a la composición de las partículas magnéticas. Los Vertisoles muestran un mayor contenido de Ti en las $Ti(Mgt-Mgh)_{+Ti}$ con respecto al Andosol y Luvisol, $Ti(Mgt-Mgh)_{-Ti}$, probablemente debido a que se desarrollan de dos materiales parentales diferentes, con una mayor concentración de ferrimagnéticos en éstos dos últimos. Se observa que la posición del perfil y la cubierta vegetal contribuyen en la tasa de material que puede incorporarse en el suelo, controlando la humedad del suelo. La variación de color en el suelo refleja el posible cambio en los minerales magnéticos duros, que sugieren que en AHVT además de tener relativamente más Gth, el intemperismo químico en éste también ha sido mayor con respecto a SUVT, donde el contenido de Hmt es relativamente abundante. No obstante, en la parte superficial de ambos suelos, es donde se encuentra la mayor cantidad de Hmt. Es decir, en su conjunto y de forma general, los resultados sugieren diferentes concentraciones de granos MD en ellos. El incipiente desarrollo de los Vertisoles, señala que las propiedades magnéticas son controladas en su mayoría por las propiedades del material parental en comparación con los perfiles BV y AHLV donde son influenciados por sus pedogénesis. *Sedov y colaboradores (2003)* establecen que las propiedades físico/químicas de un Andosol volcánico son precursores de un Luvisol volcánico, lo que se corrobora con las propiedades magnéticas de estos suelos.

Una diferencia importante entre la pedogénesis de AHVT/SUVT y AHLV es el tipo y contenido de arcilla. Es decir, tanto en mineral como en su fracción granulométrica son magnéticamente factores relevantes. En fracción se ha observado que a ésta se le asocia con valores más altos registrados en sus parámetros magnéticos. En composición, su contenido y clase influye en el proceso pedogenético que actúa sobre el suelo y por ende el mecanismo que controla la formación, alteración y distribución de la mineralogía magnética y sus propiedades. El Vertisol presenta una menor evolución y desarrollo pedológico, con arcillas 2:1, que son asociados con procesos de expansión/contracción, hidratación/deshidratación, un mayor lavado y traslocación de material, así como oxidación/reducción, mientras que en el Luvisol, con mayor evolución y desarrollo en la mayoría de los casos, la estabilidad pedológica del suelo favorece más los procesos de oxidación/reducción así como la eluviación/iluviación con respecto al Vertisol.

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

6.3 Volcán Nevado de Toluca

6.3.1 Perfil CR

(Cráter, Regosol)

De acuerdo con las curvas k vs T (**Figura 26 a,b**) la mineralogía del suelo está compuesta principalmente por $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt , aunque éstas se encuentran mezcladas con minerales meta estables como $Ti(Mgh)-Mgh$, Hmt , y Gth , las dos últimas en una proporción menor. Esto se corrobora por el grado de reversibilidad (*Jelenska et al., 2010; entre otros*) de las curvas k vs T ($\sim GR \leq |30|$), y los cambios en que se registran en dichas curvas (que influyen en el desplazamiento de las T_c 's) probablemente debido a las impurezas y/o intercambio de cationes (*Pan et al., 2006; Sosa y Alvarado, 2010*) que están presentes en el suelo. En general, la coloración del suelo (**Tabla 7, P.ej., Kumaravel et al., 2010**), los cambios de pendientes (dm/dH) durante la adquisición de IRM (*Maher et al., 2003; Jordanova et al., 2011*), y las variaciones en los parámetros de concentración y coercitividades (**Tabla 13a**), también permiten inferir y corroborar la presencia de dicha mineralogía (**Figuras 28a-f** y **Figuras 28k-p**).

En los horizontes A y AC el grado de irreversibilidad de sus curvas k vs T (**Figura 26a**) es menor con respecto al horizonte C ($\sim GR \leq |3|$), lo cual sugiere una relativa baja tasa de alteración ($Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt) en la parte superficial del suelo, probablemente debido a un menor grado de pedogénesis (*Deng et al., 2004; Carracho y Villalain, 2011*). Esto se refleja en la presencia de una baja cantidad de minerales meta estables $Ti(Mgh)-Mgh$ y Hmt (debido al desplazamiento de sus T_c 's primarias hacia temperaturas inferiores a éstas), lo que también se infiere a partir de la mezcla de coercitividades variables y la *pre-saturación* a campos bajos ($200mT < H$) como han sugerido previamente otros autores (*De Boer et al., 2001; Maher et al., 2004; Jordanova et al., 2011, etc.*). Por otro lado, el aumento que se registra en χ , $\Delta\chi$ y NRM en la parte superficial del horizonte A (**Figuras 28a-c**), se relaciona con un sutil decremento en $SIRM_{1T}/\chi$, así como en el resto de las remanencias. Esto sugiere un suave incremento de paramagnéticos y/o antiferrimagnéticos (**Figuras 28d-f**). En el horizonte AC la concentración de paramagnéticos es relativamente homogénea (χ y $\Delta\chi \sim$ constante), mientras que la tendencia de $SIRM_{1T}/\chi$ sugiere un contenido de antiferrimagnéticos homogéneo. En el horizonte AC, el contenido de paramagnéticos es relativamente bajo y homogéneo (poca variabilidad de χ , $\Delta\chi$), mientras que las remanencias reflejan un incremento variable de ferrimagnéticos hacia la parte baja del horizonte (**Figuras 28c-e**).

Los decrementos que se observan en las remanencias (NRM, ARM, SIRM_{1T}) pueden ser el resultado una ligera disminución de ferrimagnéticos. Por otro lado, los valores y comportamientos registrados en los perfiles SIRM_{1T}/χ (bajos) y χ_{fd%} (valores ~ 3-5) en ambos horizontes (A y AC) resaltan las mezclas de dominios MDs ~ (SP+SD) y MD, en donde lo que prevalecen son los granos MD (*Thompson y Oldfield, 1986; Dearing, 1999*). La concentración de partículas SP es casi nulo (~χ_{fd%} ≤ 3%), siendo relativamente abundantes solo en la parte superficial del suelo. De forma generalizada, la disminución de ARM/IRM₁₀₀, y los mínimos registrados en χ_{ARM} y χ_{ARM}/SIRM_{1T} indican que en la parte superficial del horizonte A existe un decremento de los granos SD ~ límite a SD/SSD, sugiriendo la presencia de granos PSD. Esta distribución de tamaños de dominio magnético en la parte superficial del horizonte A coincide con los valores altos de χ y con el decremento en las remanencias. Esto sugiere una relativa rápida y moderada transformación del horizonte. De acuerdo con los parámetros de dureza (**Figuras 28k-p**), el comportamiento de H_{CR}, que es inversamente proporcional a los cocientes S (S₁₀₀ ≤ 0.75) con pocas variaciones, y L~decrece sutilmente en los horizontes A y AC indican que existe una mezcla de minerales de coercitidades variables, lo que resulta más evidente en el horizonte A (*Robinson, 1986; Liu et al., 2007; Quinton, 2011*). No obstante, lo que predominan en los dos horizontes son los granos magnéticos suaves (S₃₀₀ > 0.9) y probablemente los minerales de coercitividad media (Mgh, P.ej.) al registrar tendencias inversas entre los cocientes S₁₀₀ y HIRM₁₀₀ (*Liu et al., 2007*), mezclados con Hmt, cuya concentración decrece hacia la parte baja del horizonte AC. Esto resulta consistente con la posibilidad de que sea resultado de un intemperismo rápido e intenso, lo que se infiere a partir del tamaño de grano (relativo decremento de granos gruesos) y la concentración de las partículas de mayor coercitividad en la parte superficial del suelo (*Liu Q., et al 2007; Quinton, 2011; Liu C., 2012*). El decremento de HIRM₃₀₀ y de L, así como la coloración de los horizontes sugieren un posible aumento de Gth hacia la parte media del horizonte AC.

Por otro lado, las curvas k vs T (**Figura 26b**) del horizonte C (p.ej., se muestra la del límite entre los horizontes AC/C) poseen un mayor grado de irreversibilidad (GR~|30.3|), lo cual sugiere una pedogénesis más intensa. La presencia de Ti(Mgt)_{-Ti}/Mgt como el principal mineral magnético en el horizonte, se corrobora por la mayor intensidad en su adquisición (IRM) con respecto a los horizontes A y AC (**Figura 27a**), que se encuentran mezclados con otras fases como Gth, Ti(Mgh)/Mgh y Hmt, ambas meta estables posiblemente por su alteración a bajas temperaturas. El decremento registrado en NRM (**Figura 28c**), así como los bajos y ~constantes valores registrados en Δχ y SIRM_{1T}/χ (**Figuras 28b,e**) sugieren una concentración de paramagnéticos relativamente

Tabla 13a.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de CR.

Perfil CR Regosol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
A	Ti(Mgb)-Ti, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔV_{TC}), ΔT_{NS} , GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ decrece, χ , $\Delta\chi$ ~ decrecen, SIRM _{1T/7} / χ ~ aumenta, ARM, SIRM _{1T} ~ disminuyen	SIRM _{1T/7} / χ ~ aumenta, $\chi_{0.05}$ ~ bajo, decrece, cte., ARM/IRM ₁₀₀ ~ alto, decrece, χ_{ARM} , variable, alto, decrece, $\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$, aumenta, cte.	H _{CR} > 50mT, ~ variable, L, HIRM ~ decrecen, ctes., S ~ variables, aumentan, decrecen HIRM ~ S ⁻¹
AC	Ti(Mgb)-Ti, Mgt Ti(Ngh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔV_{TC}), ΔT_{NS} , GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ decrece, χ , $\Delta\chi$, SIRM _{1T/7} / χ ~ ctes., ARM, SIRM _{1T} ~ aumentan	SIRM _{1T/7} / χ ~ cte., $\chi_{0.05}$ ~ bajo, cte., ARM/IRM ₁₀₀ ~ bajo, aumenta, χ_{ARM} , $\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$, aumentan	H _{CR} > 50mT, ~ cte., L, HIRM ~ decrecen, ctes., aumentan S ~ ctes.,
C	Ti(Mgb)-Ti, Mgt Ti(Ngh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔV_{TC}), ΔT_{NS} , GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ decrece, χ , aumenta, $\Delta\chi$, decrece, SIRM _{1T/7} / χ ~ ctes., ARM, SIRM _{1T} ~ aumentan	SIRM _{1T/7} / χ ~ cte., $\chi_{0.05}$ ~ bajo, cte., ARM/IRM ₁₀₀ ~ bajo, aumenta, χ_{ARM} , $\chi_{ARM}/SIRM_{1T}$, disminuyen	H _{CR} > 50mT, ~ aumenta, L ~ variable, HIRM ~ aumentan, S ~ variables, decrecen, aumentan, HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₅₀₀ ⁻¹ HIRM ₁₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/o Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)_{TI} (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mgt)_{TI} (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh(maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), ΔV_{TC} (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), ΔT_{NS} (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs. T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

homogénea, con un aumento de granos ferrimagnéticos hacia el fondo del horizonte (aumento de ARM y $SIRM_{1T}$). De manera general, los valores homogéneos de $SIRM_{1T}/\chi$ y bajos de $\chi_{fd\%}$ (<3%) indican que en el suelo lo que predominan son las mezclas de granos MDs~(SP+SD) y MD, en donde los granos SP son casi nulos, por lo que las partículas MD son las más abundantes (*Thompson y Oldfield, 1986; Dearing 1999;*). En la parte superficial, hay un ligero repunte de los granos SD próximos a sus límites con ~SD/SSD y ~SP/SD. De acuerdo con los parámetros de dureza, el horizonte presenta una mezcla de coercitividades variable, en el que prevalecen los granos magnéticos suaves. De acuerdo con *Anderson (2008)*, los comportamientos inversamente proporcionales entre los cocientes HIRM son indicativo de la presencia de Mgt dura, mientras que los comportamientos opuestos entre $HIRM_{100}$ y S_{100} en la parte superficial señalan la presencia de Mgh (*Liu et al., 2007*). *Quinton (2011)*, así como *Liu y colaboradores (2007)* entre otros, sugieren que L es un criterio para establecer la certeza los cocientes como registro de Hmt, indicando una distribución dispersa dentro del horizonte de acuerdo con los criterios que establecieron, siendo relativamente mayor ésta en la región media. Esto es congruente con la disminución de ferrimagnéticos que se observa en los perfiles de las remanencias, por lo que probablemente lo que predomina en el horizonte es la Gth (*Liu et al., 2013*).

6.3.2 Perfil IGF1N

(Regosol, Ladera 1)

La mineralogía magnética del suelo es similar a la que se observa en el perfil previo, y está compuesta principalmente por $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt, como el principal mineral magnético presente en el suelo. Esto se corrobora por las curvas k vs T que debido a sus variaciones e irreversibilidad indican la presencia de otras fases magnéticas de coercitividad variable, producto de la alteración de las $Ti(Mgt)$ -Mgt, como $Ti(Mgh)$ -Mgh, Hmt y Gth. El desplazamiento de T_c 's puede ser utilizado como un registro del origen primario de los minerales magnético y/o de las impurezas que contienen las $Ti(Mgt)$ como han propuesto varios autores previamente (*Wall, 2000; Deng et al., 2004; Pan et al., 2006; p.ej.,*). La presencia de estas fases magnéticas en el suelo también se corrobora por la coloración del suelo (**Tabla 7**), el comportamiento de las curvas de adquisición de IRM (**Figura 27b**), así como por sus perfiles magnéticos de concentración (**Figuras 29a-f**) y dureza magnética (**Figuras 29k-p**) respectivamente (**Tabla 13b**), (*Balsam et al., 2010; Jordanova et al., 2011*).

Los cambios registrados en las curvas k vs T dentro de los horizontes A y AC (**Figura 26c**) señalan que en éstos la mineralogía magnética está compuesta principalmente por $Ti(Mgt)_{-Ti}$ /Mgt y

Ti(Mgh)-Mgh que se encuentran mezcladas con Hmt metaestable (secundaria $\Delta H_{mt_{Tc's}} < H_{mt_{Tc}}$) y Gth, ésta última en menor concentración. Esto se sustenta con el grado de reversibilidad ($GR \sim |13.8|$) de sus curvas que indica una alteración moderada (*Jelenska et al., 2010; Carracho y Villalain, 2011*), probablemente de una oxidación parcial a bajas temperaturas que da lugar a la Ti(Mgh)/Mgh, y que es una fase precursora de Hmt (*Feng et al., 2004; Jordanova et al., 2010*), la coloración del suelo ($\sim 10YR$) y su saturación ($H \sim 300mT$) en las curvas de adquisición (**Figura 27b**). La relación directa y variable que existe entre $\Delta\chi$ y NRM corrobora la mezcla heterogénea de minerales magnéticos en ambos horizontes, en donde la concentración de paramagnéticos es menor dentro del horizonte AC (**Figuras 29b,c**). El aumento de χ en ambos horizontes es congruente con el comportamiento (incremento) que se registra en los de remanencias (**Figuras 29a,c,d**). Esto refleja un predominio de los granos ferrimagnéticos, el cual es mayor en el horizonte AC con respecto al horizonte A, registrando sutiles decrementos en la transición entre horizontes. Por otro lado, el comportamiento homogéneo de $SIRM_{IT}/\chi$ en los horizontes A y AC sugiere la mezcla partículas magnéticas (SP+SD)~MDs (*Thompson y Oldfield, 1986*). De acuerdo con los criterios de varios autores, la similitud de los perfiles ARM/IRM_{100} ($SD \sim SD/PSD$), χ_{ARM} (SD/SSD) y $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$ (SD) para estos horizontes indica que el contenido de SD es relativamente homogéneo con una suave disminución de su contenido hacia la parte baja del horizonte AC, que resalta un ligero aumento de granos MD en dicha región (*Maher, 1988; Geiss, 1999; Su et al., 2015*). Los valores bajos que se registran en $\chi_{fd\%}$ ($< 2\%$) son indicativo del escaso contenido de partículas SP en ambos horizontes, corroborando así, la mayor abundancia de granos gruesos en el suelo (*Dearing, 1999*).

Los parámetros de dureza magnética (**Figuras 29k-p**) son consistentes entre sí, muestran que en los horizontes existe una mezcla de granos de coercitividad variable, con una distribución y composición diferente, incrementándose la concentración de mayor coercitividad hacia la parte baja del horizonte AC (aumento de H_{CR} , p.ej.). El comportamiento de L sugiere la presencia de Hmt con variaciones en su concentración que se encuentran mezcladas con otros minerales de coercitividades medias y bajas, lo que es congruente con los valores y tendencias de los cocientes HIRM y S (*Bloemendal y Liu, 2005; Hao et al., 2009; Quinton, 2011; Yamazaki e Ikehara, 2012*). Varios autores han establecido la relación directa entre las concentraciones de los minerales magnéticos de alta coercitividad (Hmt-Gth), postulando que magnéticamente su concentración tiene una relación inversamente proporcional dentro del suelo (*Liu et al., 2013*). De acuerdo con los resultados en la parte superficial del horizonte A es donde existe un relativo mayor contenido de Gth. La presencia

de Ti(Mgh)-Mgh presente de forma homogénea en ambos horizontes, se infiere a partir de la relación inversa que se presenta entre los perfiles de $HIRM_{100}$ y S_{100} (*Liu et al., 2007*). De acuerdo con *Anderson (2008)*, los cocientes HIRM con tendencias opuestas entre sí son indicativo de la presencia de Mgt dura, que en este caso se encuentra presente en la transición entre ambos horizontes.

Por otro lado, la mineralogía magnética del horizonte C se caracteriza por un sutil incremento de posibles impurezas en las Ti(Mgt)/Mgt lo cual se estaría reflejando en el menor grado de reversibilidad ($GR \sim |36|$) y el desfase de Tc's con respecto a los horizontes A que se observa en sus curvas k vs T, así como en la disminución en la adquisición de IRM (*Figuras 26d, 27b*). Estos minerales se encuentran mezclados con otras fases como Gth, Ti(Mgh)-Mgh, Hmt, con una concentración y distribución variables. De manera general, la tendencia creciente que se registra en los parámetros de concentración magnética (*Figura 29a-e*) señalan que en el horizonte predominan las partículas ferrimagnéticas, mismas que decrecen en la parte baja. El suave incremento de χ , $\Delta\chi$ y NRM en la parte baja es congruente con el comportamiento opuesto que se presenta con el resto de los parámetros de concentración, lo que sugiere el aporte de partículas para y anti/ferrimagnéticas (*Figuras 29a-c*). De acuerdo con los parámetros de dominio magnético (*Figuras 29g-j*) en el horizonte hay una mezcla de granos que es controlada por la mayor abundancia de granos MD que resaltan la escasa presencia de partículas SP, así como una dispersión selectiva de los SD con sus diferentes límites. En la parte superior del horizonte existe un sutil y relativo incremento, aunque sus curvas corroboran la presencia de granos gruesos.

6.3.3 Perfil IGF2N

(Regosol, Ladera 2)

La mineralogía magnética de este suelo es similar en todo el perfil, y de acuerdo con las curvas k vs T (*Figuras 26e,f*), lo que más abunda son las Ti(Mgt)-Ti, Mgt, que están coexistiendo con otra fases como Ti(Mgh)-Mgh, Gth y Hmt, todas ellas en menor concentración, con la contribución de posibles impurezas que influyen en las variaciones de los diversos parámetros magnéticos (*Dilon y Blei, 2006; Sosa y Alvarado, 2010*). La coloración del suelo (*Tabla 7*), las curvas de adquisición de IRM (*Figura 27c*), los parámetros de concentración (*Figuras 30a-e*) y de dureza (*Figuras 30k-p*) reflejan la presencia de minerales con un espectro de coercitividades variables como Ti(Mgh)-Mgh, Gth y Hmt, todas éstas con una contribución distinta (*Tabla 13c*).

Tabla 13b.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de IGF1N.

Perfil IGF1N Regosol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
A	Ti(Mgb)-Ti, Mgt Ti(Mgb), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ ΔT_{CS} , ΔT_{NS} , GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ decrecen, χ , $\Delta\chi$ ~ disminuyen, ARM, SIRM _{IT} , ~ decrecen	SIRM _{IT} / χ ~ cte., $\chi_{60\%}$ ~ bajo, decrece ARM/IRM ₁₀₀ ~ aumenta χ_{ARM} ~ cte., decrece, $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$, ~cte., aumenta	H _{CR} ~ 50mT, ~ aumenta, L, HIRM ~ ctes., aumentan, S ~ ctes., decrecen, HIRM ₁₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹
AC	Ti(Mgb)-Ti, Mgt Ti(Mgb), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ ΔT_{CS} , ΔT_{NS} , GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ variable, χ , $\Delta\chi$ ~ aumentan, ARM, SIRM _{IT} , ~ ctes., decrecen	SIRM _{IT} / χ ~ cte., $\chi_{60\%}$ ~ bajo, variable, aumenta, ARM/IRM ₁₀₀ ~ alto, cte, decrece, χ_{ARM} ~ cte., alto, decrece, $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$, ~cte., decrece	H _{CR} ~ 50mT, ~ cte., L, HIRM ~ aumentan, S ~ ctes., decrecen, HIRM ₁₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹
C	Ti(Mgb)-Ti, Mgt Ti(Mgb), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ ΔT_{CS} , ΔT_{NS} , GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ variable, aumenta, χ , ~decrece, $\Delta\chi$ ~ aumenta, ARM, ~ aumenta, SIRM _{IT} , ~ decrecen	SIRM _{IT} / χ ~ aumenta, $\chi_{60\%}$ ~ bajo, aumenta, ARM/IRM ₁₀₀ ~ alto, cte., decrece, χ_{ARM} ~ bajo, aumenta, $\chi_{ARM}/SIRM_{IT}$, ~cte., variable	H _{CR} ~ 50mT, ~ cte., L, HIRM ~ variable, aumentan, decrecen, S ~ decrecen, HIRM ₁₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/o Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)_{IT} (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mgt)_{IT} (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh(maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), ΔT_{CS} (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), ΔT_{NS} (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs.T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

Probablemente los horizontes A y AC poseen Ti(Mgt)-Mgt, que coexisten con una mayor cantidad de paramagnéticos y/o impurezas, contribuyendo a que éstas sean relativamente más resistentes a su alteración, lo que se puede asociar conjuntamente con su grado de reversibilidad en sus curvas k vs. T ($GR \sim 0$), así como en las bajas remanencias en sus curvas de adquisición de IRM (**Figura 27c**). La coloración del suelo, ($\sim 10YR$), y los cambios en las curvas k vs T muestran una mezcla de minerales de coercitividad variable como Ti(Mgh)-Mgh, Gth y Hmt, que coexisten con las Ti(Mgt), todas éstas en menor proporción (*P.ej., France y Oldfield, 2000; Ovalles, 2003; Saffudin et al., 2011*). De forma generalizada, los parámetros de concentración (**Figuras 30**) son consistentes con la mineralogía inferida previamente, al registrar una relativa mayor contribución de partículas ferrimagnéticas en ambos horizontes, siendo más homogénea su concentración (χ y $SIRM_{IT} \sim$ constantes) dentro del horizonte AC. En la parte superior del horizonte A existe un sutil aumento de partículas paramagnéticas (decrementos en $\Delta\chi$, ARM, y valores relativamente altos de χ). El comportamiento relativamente variable de $SIRM_{IT}/\chi$ (**Figura 30f**) y los bajos valores de $\chi_{fd\%}$ (**Figura 30g**) sugieren que en el suelo existe una mezcla de dominios magnéticos compuesta por granos $MD_s \sim (SP+SD)$ y MD (*Thompson y Oldfield, 1986; Dearing, 1999*). Las partículas gruesas son las más abundantes, resaltando la escasa presencia de partículas SP. El resto de los perfiles magnéticos asociados con los dominios indican que en los horizontes, los granos SD se encuentran dispersas (**Figuras 30h-j**). En el horizonte A hay un incremento gradual de SD hacia la transición con el horizonte AC, donde se presenta un relativo aumento de los granos gruesos, superficialmente, que decrece hacia la parte inferior del horizonte, resaltando un suave aumento nuevamente de SD. Los parámetros de dureza magnética (**Figuras 30 k-p**) muestran la mezcla de coercitividades variables que sugieren la coexistencia de minerales de alta coercitividad, Hmt y Gth, con una distribución relativamente homogénea de la primera (*Liu Q, et al., 2007*). *Liu Z y colaboradores (2013)* sugieren que valores bajos de $HIRM_{300}$, son indicativo de un sutil aumento de Gth, lo que ocurre en la parte superficial del suelo. Los valores opuestos entre los cocientes $HIRM$ reflejan la presencia de Mgt dura (*Anderson, 2008*) que están mezcladas con una concentración homogénea de Mgh, de acuerdo a la relación inversa que se observa entre los cocientes $HIRM_{100}$ y S_{100} (*Liu et al., 2007*).

Por otro lado, en el horizonte C lo que más abunda son las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt, lo que se refleja en la mayor remanencia que se registra en las curvas de adquisición de IRM (**Figura 27c**). De acuerdo con las curvas de k vs T , su mayor grado de irreversibilidad con respecto al resto de los horizontes del perfil ($GR \sim |27|$) así como los cambios en sus curvas y el desplazamiento de las T_c 's

son evidencia de una mayor concentración de minerales meta estables como Ti(Mgh)-Mgh y Hmt que están mezcladas con Gth. Los valores homogéneos de χ son consistentes con el incremento gradual de NRM y los bajos valores de $\Delta\chi$ en la parte superior, que en su conjunto sugieren una mayor contribución de partículas para y antiferrimagnéticas (**Figuras 30a-c**). Esto es consistente con el incremento gradual de las remanencias hacia la parte inferior del horizonte que señala el aumento de ferrimagnéticos. Los bajos valores de $\chi_{fd\%}$ muestra que en el suelo la concentración de granos SP es escasa, predominando las partículas de mayor tamaño que se encuentran coexistiendo con una mezcla de SD, mismos que tienden a registrar una mayor abundancia hacia la parte baja del suelo. De acuerdo con resultados análogos reportados por *Quinton (2011)* y *Liu y colaboradores (2007)* entre otros, la presencia de Hmt es homogénea, y predomina sobre la concentración de Gth, y éstas fases se encuentran mezcladas con Mgh y Mg dura también (*Liu et al 2007; Anderson, 2008*).

6.3.4 Perfil IGF1D

(Regosol, Ladera 3)

De manera general, y de acuerdo con las curvas k vs T , su grado de reversibilidad homogéneo ($GR \sim |14|$), la mineralogía magnética del perfil está compuesta por Ti(Mgt)-Ti, Mgt en su mayoría (**Figura 26g-h**). Sin embargo, los cambios que se registran en sus curvas y el desplazamiento de sus T_c 's son indicadores de la presencia de otras fases magnéticas como Ti(Mgh)-Mgh, Hmt y Gth, todas ellas con una concentración menor y una dispersión diferente a lo largo del suelo. Su presencia también se infiere a partir de las curvas de adquisición de IRM (**Figura 27d**), la coloración del suelo (**Tabla 7**), así como los perfiles magnéticos de concentración (**Figura 31a-e**) y dureza (**Figura 31k-p**) magnética (**Tabla 13d**). En la parte superficial del suelo (horizontes A y AC) lo que más abundan son las Ti(Mgt)-Mgt que poseen una posible inclusión sutil de *impurezas* que dan origen a fases meta estables como Ti(Mgh)/Mgh, Hmt que coexisten con Gth (*Torrent, 1983; Pan et al., 2006; Dillon y Blei, 2006*). El cambio $T_c \sim 120^\circ\text{C}$ y la coloración de los suelos ($\sim 5Y$) sugieren la presencia de Gth, mientras que las curvas de adquisición (IRM) señalan la mezcla de coercitividades siendo mayor la remanencia adquirida en el horizonte A. La variabilidad de la curva $\Delta t \sim 200/300^\circ\text{C}$ indica la presencia de Ti(Mgh)-Mgh, mientras que el decremento $\sim 300/400^\circ\text{C}$ sugieren la presencia abundante de Hmt, en ambos casos, como fases meta estables. De acuerdo con las curvas de adquisición de IRM, éstas podrían estar en mayor concentración dentro del horizonte AC.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (VNT)

Tabla 13c.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de IGF2N.

Perfil IGF2N Regsol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
A	Ti(O)gd-TR, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (Δrc)s, ATN's, GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Coeficientes HIRM, S Color	χ, NRM ~ variables, Δχ ~ aumenta ARM ~ decrece, SIRM _{TR} ~ variable	SIRM _{TR} /χ ~ decrece, χ ₆₀₀ ~ bajo, aumenta, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., alto, decrece, χ _{ARM} ~ χ _{ARM} /SIRM _{TR} ~ bajos y aumentan	H _{CR} ≥ 50mT, ~ variable, L _s ~ cte., aumenta, HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₃₀₀ ⁻¹ , HIRM ₅₀₀ ~ aumentan, S ~ variables, aumentan, decrecen
AC	Ti(O)gd-TR, Mgt Ti(Mgd), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (Δrc)s, ATN's, GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Coeficientes HIRM, S Color	χ, ~ cte., NRM ~ Variable, decrece, Δχ ~ variable, decrece, aumenta, ARM ~ aumenta, SIRM _{TR} ~ cte., SIRM _{TR} /χ ~ aumenta	SIRM _{TR} /χ ~ cte., χ ₆₀₀ ~ bajo, cte., ARM/IRM ₁₀₀ ~ bajo, aumenta, cte., χ _{ARM} , χ _{ARM} /SIRM _{TR} ~ variables, decrecen, aumentan,	H _{CR} ≥ 50mT, ~ decrece, L _s ~ cte., HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₃₀₀ ⁻¹ , HIRM ₅₀₀ ~ decrece, S ~ aumentan
C	Ti(O)gd-TR, Mgt Ti(Mgd), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (Δrc)s, ATN's, GR IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Coeficientes HIRM, S Color	χ, ~ cte., NRM ~ aumenta, decrece, aumenta, ARM ~-aumenta, SIRM _{TR} ~ cte.,	SIRM _{TR} /χ ~ aumenta, χ ₆₀₀ ~ cte., ARM/IRM ₁₀₀ ~ bajo, aumenta, χ _{ARM} ~ variable, χ _{ARM} /SIRM _{TR} ~ ~aumenta	H _{CR} ≥ 50mT, ~ variable, aumenta, decrece, L _s ~ cte., aumenta, HIRM ~ aumentan, decrecen, HIRM ₅₀₀ ~ aumentan, HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₃₀₀ ⁻¹ , S ~ variables, decrecen

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/ó Hmt. Mgh. La simbología representa Ti(Mgd)_{TR} (titanomagnética con poco Ti), Mgt (magnética), Ti(Mgd)_{TR} (titanomagnética rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomagnética), Mgh(magnética), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), Δrc_s (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), ATN's (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs.T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

Los bajos valores en la parte superficial del horizonte A en χ , $\Delta\chi$ y sus remanencias (**Figuras 31a-e**) sugieren una baja concentración de minerales ferrimagnéticos, mismos que se incrementan hacia la parte inferior del horizonte, donde se registra el decremento (transición horizonte A/AC). La relación inversa entre χ y SIRM_{1T}/χ (**Figuras 31a,f**) refleja la posible contribución de paramagnéticos en ambos horizontes, la cual disminuye hacia la parte superior del suelo, en el horizonte A. Los bajos valores de $\chi_{fd\%}$ indican que en los dos horizontes lo que prevalece son las mezclas de partículas (SP+SD)~MD y SP+MD, en el que la concentración de SP es escasa, siendo los granos MD los granos más abundantes (*Thompson y Oldfield, 1986; Dearing, 1999; Lu Sh et al., 2008*). El contenido de SD es variable, fluctuando entre sus límites con SD~SD/PSD, y SD/SSD, disminuyendo ligeramente su abundancia en el horizonte A con respecto al horizonte AC. Los parámetros de dureza (**Figuras 31k-p**) reflejan la mezcla de coercitividades (*Liu et al., 2007; Hao et al., 2009*), sugiriendo un gradual cambio en la concentración/composición de los granos magnéticamente duros (*Liu Z et al., 2013, p.ej.,*), lo que es consistente con la concentración de ferrimagnéticos. Los valores más altos de H_{CR} , HIRM_{300} y L dentro del horizonte A indican una mayor concentración de Hmt, misma que disminuye hacia la parte inferior, sugiriendo una mayor y más homogénea concentración de Gth en el horizonte AC. La relación inversa entre los cocientes HIRM_{100} y S_{100} son indicios de la presencia de Mgh en los dos horizontes, registrándose en la parte superficial de ambos, mientras que los valores opuestos en su parte superficial entre los cocientes HIRM señalan la presencia de Mgt dura (*Liu et al., 2007; Anderson, 2008; Quinton, 2011*).

A diferencia de los horizontes A y AC, en el horizonte C dominan las $\text{Ti}(\text{Mgt})_{-Ti}/\text{Mgt}$, con un menor contenido de impurezas, lo que se refleja en su registro de k vs T (~3:1 mayor), así como en el desplazamiento de sus T_c 's (**Figura 26h**). Esto influye en el cambio de composición y concentración de minerales meta estables, aumentando sutilmente el contenido de Gth, disminuyendo relativamente la cantidad de $\text{Ti}(\text{Mgh})$ -Mgh y Hmt respectivamente. Esto es consistente con el aumento de granos ferrimagnéticos que se presenta en el horizonte con respecto al horizonte AC sugerido por el suave incremento que se registra en χ y remanencias respectivamente (**Figuras 31a,c-e**). Dentro del horizonte C, predominan las mezclas de granos MD y SD, siendo las primeras las de mayor abundancia, mientras que las segundas se encuentran distribuidas de forma homogénea en el horizonte, y donde resultan escasas las partículas SP (*Thompson y Oldfield, 1986; Dearing, 1999*). Los parámetros de dureza (**Figura 31k-p**) sugieren un relativo incremento de Hmt dentro del horizonte.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (VNT)

Tabla 13d.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de IGF1D.

Perfil IGF1D Regesol	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (Concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
A	Ti(Mg) ₀₋₁₀ , Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Ghh	k vs. T ~ (A _{TCs} , A _{TNS} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ aumenta, A _γ ~ variable, γ _c ARM, SIRM _{Tr} ~ aumentan, SIRM _{Tr} /γ ~ decrece	γ ₆₀₀ ~ decrece, SIRM _{Tr} /γ ~ decrece, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., alto, decrece, γ _{ARM} , γ _{ARM} /SIRM _{Tr} ~ altos, decrecen, ctes.,	H _{CR} > 50mT, ~ decrece, L _r ~ cte., variable, HIRM ~ aumentan, decrece, S _r ~ bajo, aumentan
AC	Ti(Mg) ₀₋₁₀ , Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Ghh	k vs. T ~ (A _{TCs} , A _{TNS} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ decrece, A _γ ~ aumenta, γ _c ~ cte., ARM ~ decrece, SIRM _{Tr} , SIRM _{Tr} /γ ~ aumentan, decrecen,	SIRM _{Tr} /γ ~ aumentan, γ ₆₀₀ ~ variable, aumenta, decrece ARM/IRM ₁₀₀ ~ alto, cte., decrece, γ _{ARM} , ~ alto, cte., decrece, γ _{ARM} /SIRM _{Tr} ~ cte.	H _{CR} > 50mT, ~ decrece, L _r ~ variable, decrece, HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₅₀₀ ⁻¹ HIRM ₅₀₀ ~ decrece S _r ~ aumentan
C	Ti(Mg) ₀₋₁₀ , Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Ghh	k vs. T ~ (A _{TCs} , A _{TNS} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ aumenta, A _γ ~ decrece, γ _c ~ aumenta, ARM, SIRM _{Tr} , ~ aumentan, SIRM _{Tr} /γ ~ decrece,	SIRM _{Tr} /γ ~ decrece, γ ₆₀₀ ~ bajo, decrece ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., γ _{ARM} , ~ aumenta, γ _{ARM} /SIRM _{Tr} ~ cte.	H _{CR} > 50mT, ~ decrece, L _r ~ aumenta, HIRM ₁₀₀ ~ cte., HIRM ₅₀₀ ~ aumenta, S ₁₀₀ , ~ aumenta, S ₅₀₀ ~ cte.

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna). Los parámetros de los cuales se infiere la concentración (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitvidades, p.ej., Ghh y/ó Hmt. Mgh. La simbología representa Ti(Mg)₀₋₁₀ (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mg)₁₋₁₀ (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomagnetita), Mgh(magnetita), Hmt (Hematita), Ghh (Goethita), A_{TCs} (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), A_{TNS} (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs. T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

6.3.5 Perfil IGF2D

(Regosol, Ladera 4)

Las curvas k vs T de este perfil son relativamente semejantes entre sí, muestran un grado de irreversibilidad moderado ($\sim GR \leq 22$) reflejando a profundidad curvas más reversibles, lo que sugiere la presencia de minerales menos alterados. En general, en el suelo lo que predomina son las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt que se encuentran mezcladas con un espectro de minerales de coercitividad variable y de carácter meta estable como las $Ti(Mgh)-Mgh$, Gth y Hmt , todas éstas en una menor proporción. Esto se infiere a partir de los cambios ($\sim Tc$'s) registrados en las curvas k vs T (**Figura 26i-j**), las pendientes de las curvas de adquisición de IRM (**Figura 27e**), la coloración del suelo (**Tabla 7**), así como los perfiles magnéticos de concentración (**Figuras 32a-e**) y dureza (**Figuras 32k-p**) de las partículas magnéticas respectivamente (**Tabla 13e**).

En los horizontes A y AC las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt coexisten con $Ti(Mgh)-Mgh$ (cantidad moderada), Gth y Hmt meta estable, siendo la concentración de ésta última relativamente mayor en el horizonte A (**Figuras 26i-j**). Esto es congruente con la mayor remanencia que registra el horizonte AC en las curvas de adquisición (**Figura 26e**) y los cambios en sus curvas ($\sim H \leq 100mT$ y $H \sim 400 mT$). En el horizonte A, la relación inversa entre las tendencias de χ y $SIRM_{IT}$ (**Figuras 32a,e**) con respecto a las de $\Delta\chi$ y ARM (**Figuras 32b,d**) reflejan un predominio de partículas ferrimagnéticas cuya concentración se incrementa hacia la parte inferior del horizonte. Éstas se encuentran mezcladas con granos paramagnéticos y antiferrimagnéticos, con una mayor abundancia relativa de éstos últimos en la parte superficial del horizonte. Por el contrario, en el horizonte AC existe una disminución gradual de ferrimagnéticos, consistente con un aumento sutil de paramagnéticos hacia la transición con el horizonte C. Los bajos valores de $\chi_{fd\%}$ sugieren que en ambos horizontes hay una escasa contribución de granos SP, por lo que son más abundantes las partículas de mayor tamaño (**Dearing, 1999**). De acuerdo con Lu Sh y colaboradores (**2008**), en la parte superficial de los dos horizontes hay una mezcla de granos SP+MD, resaltando la escasa contribución de los granos SP. Los granos SD y sus límites con otros dominios magnéticos (SD~SD/SP; SD/SSD, p.ej.,) se encuentran coexistiendo con las abundantes partículas MD (**Geiss; 1999**). De manera general, existen sutiles incrementos en la abundancia de granos SD dentro de los horizontes (A y AC), observándose que en la región media de éstos la presencia de partículas PSD (horizonte A superficial). Los perfiles de dureza magnética (**Figuras 32k-p**) señalan que en los horizontes existe una variabilidad de coercitividades. Varios autores han establecido que el cociente L es útil como un criterio para establecer la certeza de los cocientes HIRM y S como fuente para

inferir la presencia de Hmt y Gth (*p.ej., Bloemendal y Liu, 2005; Hao et al., 2009; Liu Z et al., 2013; Su et al., 2015*). De manera general, los valores relativamente más altos de $HIRM_{300}$ y L señalan un cambio de composición entre los minerales magnéticos duros, reflejando que en la parte superficial del horizonte A hay un sutil aumento de Gth, mientras que en el horizonte AC es de Hmt, lo que es congruente con la propuesta de proporcionalidad de ambos minerales de otros reportes (*Liu Z et al., 2013*). La relación inversa entre $HIRM_{100}$ y S_{100} indican la presencia de Mgh (**Figuras 32 i,o**) en la parte superior de ambos horizontes (*Liu et al., 2007*). Los valores opuestos entre los cocientes HIRM, (registrados en la transición entre los horizontes A y AC), se han usado en trabajos previos como un indicador de la presencia de Mgt dura (*Anderson, 2008*).

El horizonte C (~ AC) tiene curvas k vs T más reversibles ($GR \sim |3|$) con respecto a las que muestra el horizonte A, lo que indica que las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt que integran la principal mineralogía magnética del suelo están menos alteradas (**Figura 26j**). Esto es congruente con una disminución y/o posible variación en la composición de aquellas fases que poseen un espectro de coercitividades variable, especialmente de $Ti(Mgh)$ -Mgh y Hmt, lo que se ve reflejado también en su curva de adquisición de IRM (**Figura 27e**). El aumento en $\Delta\chi$, NRM y $SIRM_{IT}$ en la parte superior del horizonte C muestra que ahí existe la mayor abundancia de ferrimagnéticos (**Figuras 32b-c,e**), mientras que el comportamiento de χ y ARM (~ constante) sugieren la contribución de partículas para/antiferrimagnéticas en el horizonte. De acuerdo con los parámetros asociados con los dominios magnéticos, el contenido de partículas SP es casi nulo, con un homogéneo contenido de granos SD, resaltando la abundancia de partículas MD (*Thompson y Oldfield, 1986; Dearing, 1999*). La variabilidad registrada en el perfil H_{CR} indica la mezcla de coercitividades, con un aumento de los granos de alta coercitividad, lo que es congruente con los decrementos del cociente S en la parte baja del suelo (*Robinson, 1986; Bloemendal y Liu, 2005*). La relación inversa entre los cocientes HIRM, así como entre $HIRM_{100}$ y S_{100} , son un indicador de la presencia de Mgt dura así como de Mgh respectivamente (*Anderson, 2008; Liu et al., 2007*).

Tabla 13e.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de IGF2D.

Perfil IGF2D Regosal	Composición	Parámetros (Composición)	Parámetros (concentración)	Parámetros (Dominios)	Parámetros (Dureza)
A	Ti(Mgd)-Ti, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_{CS} , ΔT_{NS} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ aumenta $\Delta\chi$ ~ decrece χ ~ aumenta, ARM ~ decrece, SIRM _{IT} ~ aumenta, SIRM _{IT} / χ ~ variable,	SIRM _{IT} / χ ~ etc., aumenta, χ_{60k} ~ bajo, decrece ARM/IRM ₁₀₀ ~ alto, cte., decrece, χ_{ARM} , χ_{ARM} /SIRM _{IT} ~ variables, aumentan, ctes., decrecen	H _{CR} < 50mT, ~ decrece. L, ~ variable, HIRM ~ aumentan HIRM ₁₀₀ ~ cte., HIRM ₃₀₀ ~ variable S ~ decrecen, aumentan, HIRM ₁₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹
AC	Ti(Mgd)-Ti, Mgt Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_{CS} , ΔT_{NS} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ decrece, $\Delta\chi$ ~ decrece χ ~ variable., ARM, ~ SIRM _{IT} ~ decrecen, SIRM _{IT} / χ ~ decrece	SIRM _{IT} / χ ~ variable, χ_{60k} ~ bajo, decrece, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., decrece, χ_{ARM} , χ_{ARM} /SIRM _{IT} ~ decrecen	H _{CR} < 50mT, ~ variable, aumenta, L, ~ decrece, HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₃₀₀ ⁻¹ , HIRM ₁₀₀ ~ cte., HIRM ₃₀₀ ~ variable, decrece. S ~ variables, S ₁₀₀ ~ S ₃₀₀ ⁻¹ , S ₃₀₀ ~ aumenta, HIRM ₁₀₀ ~ S ₁₀₀ ⁻¹
C	Ti(Mgd)-Ti, Mgt Ti(Mgh), Mgh Hmt Gth	k vs. T ~ (ΔT_{CS} , ΔT_{NS} , GR) IRM ~ (dm/dH) Ciclos histéresis Cocientes HIRM, S Color	NRM ~ decrece, $\Delta\chi$ ~ decrece χ ~ cte., decrece, ARM, SIRM _{IT} ~ cte., decrece, SIRM _{IT} / χ ~ variable, aumenta, decrece	SIRM _{IT} / χ ~ decrece, χ_{60k} ~ bajo, decrece, ARM/IRM ₁₀₀ ~ cte., χ_{ARM} , χ_{ARM} /SIRM _{IT} ~ ctes.	H _{CR} < 50mT, ~ variable, aumenta, L, ~ variable, HIRM ₁₀₀ ~ HIRM ₃₀₀ ⁻¹ , HIRM ₁₀₀ ~ aumenta, decrece., S ~ variables, decrecen, aumentan

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética que se infiere a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se presenta: el nombre del perfil, la secuencia de los horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética por horizonte, y los parámetros a partir de los cuales se infiere ésta (segunda y tercer columna). Los parámetros a partir de los cuales se infiere la concentración de las partículas magnéticas (cuarta columna), el tamaño de dominio magnético (quinta columna), y su coercitividad ó dureza (sexta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para inferir variaciones en concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/o Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgd)-Ti (titanomagnetita con poco Ti), Mgt (magnetita), Ti(Mgd)-Ti (titanomagnetita rica en Ti), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh(maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita), ΔT_{CS} (desplazamiento de la temperatura de Curie primaria de un mineral magnético), ΔT_{NS} (desplazamiento de la temperatura de Neel primaria de un mineral magnético), GR (grado de reversibilidad de curvas k vs.T), dm/dH (pendiente de curvas de adquisición de IRM), respectivamente.

6.3.6 Relación entre parámetros magnéticos

De acuerdo con el diagrama χ vs $SIRM_{1T}$, los parámetros magnéticos y la distribución de los suelos dentro del gráfico, estos reflejan una relación directa que los agrupa sobre una diagonal en la región central de la figura, con una distribución relativamente compacta (**Figura 35a**). De manera generalizada se puede observar que los perfiles (IGF1N, IGF2N) presentan los valores más bajos para los dos parámetros magnéticos. En el extremo opuesto, se localiza CR con los valores más altos, y próximos a estos se ubica IGF2D. El resto de los suelos muestran valores entre los extremos, siendo IGF1D el suelo donde se observa una mayor variabilidad relativa.

La relación χ vs $SIRM_{1T}/HIRM_{300}$, muestra valores similares para la mayor parte de los suelos con una relativa tendencia a agruparse sobre una horizontal en la parte baja del esquema, con una dispersión moderada (**Figura 35b**). De manera general, los perfiles IGF1D e IGF2N (parcialmente) son los suelos que registran una mayor dispersión dentro de la gráfica. IGF1N posee una agrupación más compacta con los valores más bajos para los dos parámetros magnéticos, mientras que IGF2D y CR tienen valores similares entre sí, y junto con IGF1N para el cociente, siendo los dos primeros los que registran valores de χ más altos.

En el esquema $SIRM_{1T}/\chi$ vs H_{CR} , los suelos muestran una clara distribución diferencial, con una tendencia a agruparse de forma moderadamente compacta en la zona media derecha del diagrama (**Figura 35c**). En ella resaltan dos asociaciones principales, a partir de las tendencias que se registran, con pocas variaciones para ambos parámetros: 1) IGF2N e IGF2D con un espectro de coercitividades semejante entre sí, y levemente más bajo con respecto al resto de los suelos, siendo más bajos los cocientes ($SIRM_{1T}/\chi$ en comparación con IGF1D, 2) El resto de los suelos, con valores relativamente más altos de H_{CR} , posee una distribución compacta (CR) con el cociente \sim IGF1D el cual tiene una mayor dispersión.

De acuerdo con el diagrama, $HIRM_{300}$ vs S_{300} , los suelos muestran una tendencia a agruparse en la región media de la gráfica, sobre una diagonal, mostrando una dispersión moderada entre los suelos que relaciona a ambos parámetros de manera inversa (**Figura 35d**). De manera generalizada, los perfiles IGF2N e IGF1D (parcialmente) tienen los valores más altos de S_{300} y bajos de $HIRM_{300}$ respectivamente, con una moderada dispersión entre la agrupación de cada suelo. En el extremo opuesto, (región inferior derecha del diagrama) se localizan los perfiles IGF1N y CR (una parte) con los valores más altos de $HIRM_{300}$ y los más bajos de S_{300} . El resto de los suelo (IGF2D, así como parcialmente IGF1N y CR) se encuentran entre los dos extremos descritos anteriormente, con valores medios y una dispersión moderada.

En la relación S_{100} vs S_{300} los perfiles tienen una tendencia a agruparse de forma relativamente compacta sobre una horizontal en el extremo superior derecho del esquema, registrando valores similares en S_{300} , pero con una mayor dispersión con respecto a S_{100} (**Figura 35e**). Sin embargo, de forma general, se puede observar una distribución selectiva de S_{100} , en donde IGF2D posee los valores más bajos (S_{100}), mientras que en el extremo opuesto, con valores más altos y una agrupación más compacta se encuentra CR, IGF2N (parcialmente) posee una mayor dispersión. El resto de los suelos se localiza entre los extremos previamente descritos, siendo IGF1D el suelo que posee un leve aumento en los valores de S_{300} con respecto al resto de los suelos.

De acuerdo con el diagrama de Day, H_{CR}/H_C vs M_{RS}/M_S , los resultados, los suelos se agrupan, en general, de forma compacta sobre una horizontal en la región superior izquierda del diagrama, próximos a la región SD/PSD (**Figura 35f**). Presentan valores similares (M_{RS}/M_S), no así para, en el cual los suelos presentan una relativa mayor dispersión, observándose que los valores más altos corresponden a IGF1D e IGF2N con CR e IGF1N con valores relativamente más bajos para dicho cociente. Entre estos dos extremos descritos previamente (H_{CR}/H_C) se ubica IGF2D.

En el gráfico, χ_{ARM} vs $SIRM_{1T}/\chi$, los suelos poseen un ordenamiento sobre una diagonal en la región media de la gráfica, con una dispersión de moderada a alta en χ_{ARM} , mientras que para el cociente ($SIRM_{1T}/\chi$) presentan una relativa mayor similitud relativa (**Figura 35g**). De manera general, una parte de IGF1D e IGF2D poseen los valores más bajos para χ_{ARM} , agrupándose de forma relativamente compacta cada uno, mientras que para el resto de los suelos, éstos registran una mayor dispersión, así como valores más altos para los dos parámetros, siendo IGF2N (parcialmente) el suelo con valores medios.

Al igual que el diagrama ARM/IRM_{100} vs $\chi_{fd\%}$ en éste, los suelos dentro del diagrama muestran de manera generalizada, una tendencia a agruparse en la zona izquierda de la figura, con una alta dispersión (**Figura 35h**). En la gráfica resalta el perfil CR por tener los valores más bajos para el cociente (ARM/IRM_{100}), mientras que en el extremo opuesto con valores más altos se ubica IGF2D respectivamente, También sobresalen IGF2N con los valores más altos de $\chi_{fd\%}$, aunque muestra valores ~ similares a los del resto de los suelos para el cociente.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Discusión (VNT)

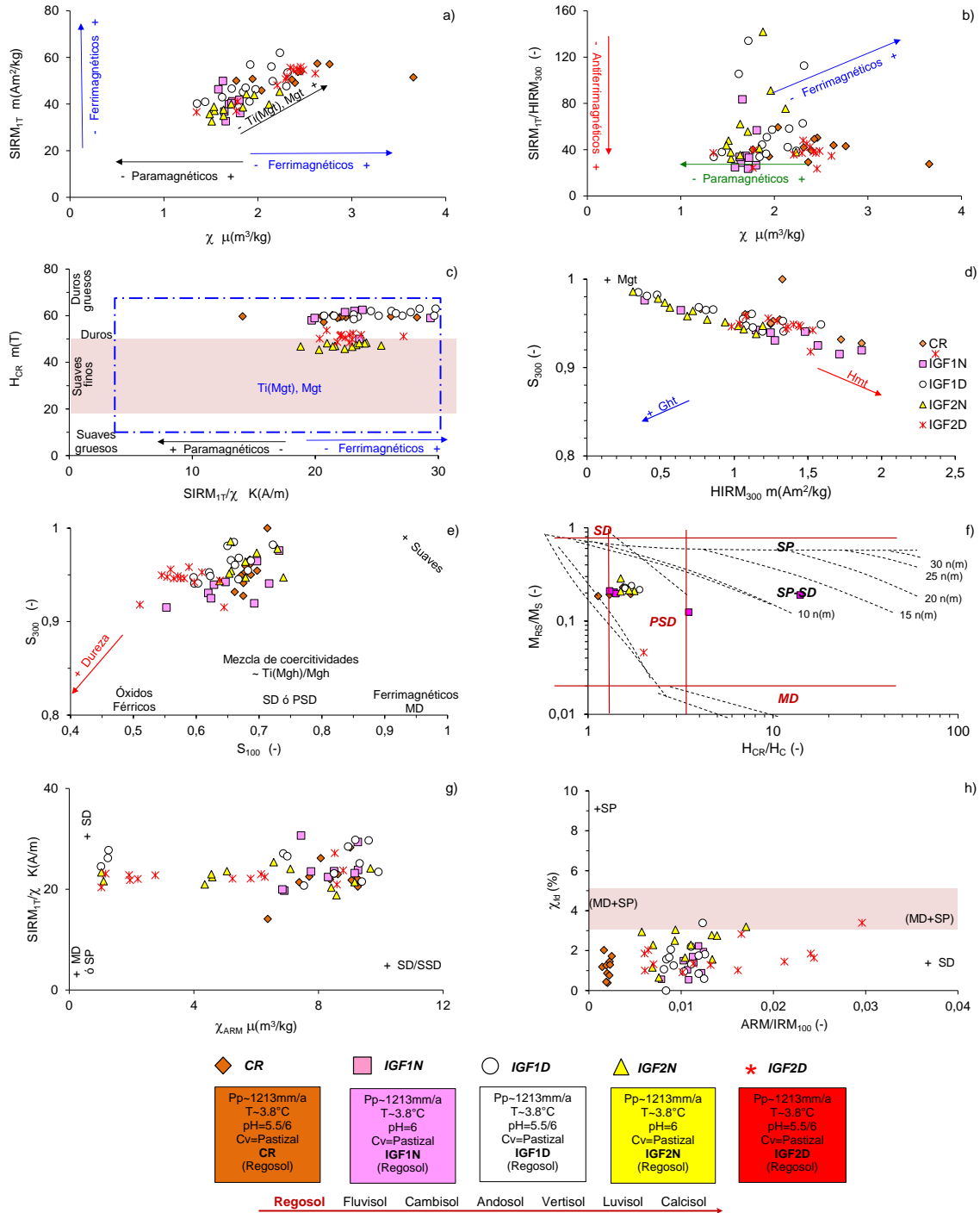


Figura 35.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos estudiados en el volcán Nevado de Toluca (VNT)). La figura consiste de diagramas que muestran la dispersión/interacción entre una selección de parámetros magnéticos analizados para los suelos de la región 3. Los perfiles son Regosoles. En la parte inferior de la figura se muestran algunas de las características ambientales bajo las que se están desarrollando los suelos, y de forma esquemática se representa el grado evolutivo de cada perfil (color rojo), con respecto al resto de los suelos analizados en esta investigación (color negro). El recuadro de color azul con línea discontinua (Figura c) denota la presencia de Ti(Mgt), Mgt. Los diagramas se construyen e interpretan a partir de diversos trabajos previos (Thompson y Oldfield, 1986; Robinson, 1986; Stockhausen y Thuoveny, 1999; Dunlop, 2002; Lu Sh., et al 2008; Liu et al 2012, etc).

En resumen, a partir del análisis conjunto y comparativo entre los parámetros magnéticos en estos diagramas (**Figura 35**), se observa que los resultados son consistentes entre sí. Además de ser un complemento para el resto de las mediciones magnéticas, son también congruentes con éstos. A pesar de ser suelos con el mismo grado evolutivo, desarrollándose bajo las mismas condiciones, la sensibilidad de los parámetros magnéticos permite identificar diversas tasas de pedogénesis. De esta forma, en general los suelos se caracterizan por presentar una abundante y homogénea concentración de partículas ferrimagnéticas (**Figura 35a**). Éstas corresponden principalmente a las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt (**Figura 35c**), mismas que se han inferido también a partir de las curvas de k vs T (**Figura 26**) y de adquisición de IRM (**Figura 27**). La distribución de los suelos en los diagramas χ vs $SIRM_{IT}/HIRM_{300}$ y S_{100} vs S_{300} (**Figura 35b,e**) es indicativo de la presencia de un espectro variable de coercitividades que se asocia con el aporte de minerales de coercitividades medias y altas como Hmt y $Ti(Mgh)-Mgh$ (**Figuras 35d,e**) siendo la concentración de éstas últimas más homogénea, lo que es consistente con las curvas k vs T y los perfiles magnéticos de dureza magnética. De acuerdo con los diagramas relacionados con la distribución de los dominios magnéticos, en los suelos lo que prevalecen son los granos gruesos (mayormente MD) que coexisten con granos finos (SD), resaltando la escasa contribución de las partículas de dominio SP en los suelos.

6.3.7 Grados de Pedogénesis y su relación con los parámetros magnéticos

Los perfiles de esta región 3 (VNT) también registran una estrecha relación de la mineralogía magnética en cada suelo, similar a lo que ocurre en las regiones previas (VT y GB) con diferentes condiciones ambientales, lo que se refleja en sus propiedades magnéticas; aunque en VNT, los suelos se desarrollan bajo las mismas condiciones ambientales, y con la misma evolución pedológica temprana (Regosoles). Sin embargo, en este caso la sensibilidad de los parámetros magnéticos permite observar ligeras diferencias entre las propiedades analizadas para cada perfil. Sobresale el hecho que, de forma análoga los suelos de ésta zona también llegan a registrar la presencia (CR) como la ausencia (resto de los perfiles) de un aumento magnético superficial, como en las regiones 1 y 2 respectivamente. De esta manera, los suaves cambios que se registran en los perfiles magnéticos (VNT) son un registro de las diferentes, aunque lentas (predominio de granos magnéticos gruesos p.ej.), tasas de interacción de los diversos grado de pedogénesis a los que son sometidos.

Compuestos en su mayoría por $Ti(Mgt-Mgh)_{-Ti}$ en la mayor parte de estos como la principal fase portadora de la magnetización de los suelos, también llegan a registrar variaciones en sus coercitividades, lo que influye en su alta concentración y distribución de partículas ferri y antiferrimagnéticas dentro del suelo.

Las condiciones ambientales, alta precipitación y baja temperatura, favorecen un intemperismo químico y físico (mecánico) moderado para los suelos, lo cual es congruente con su relación L/A. Las bajas temperaturas, no favorecen las condiciones para que se presente la formación y descomposición de M.O. para que su interacción con la mineralogía magnética actúe como posible agente reductor. Sin embargo, esta temperatura y la alta humedad contribuyen a procesos de crioclastia/termoclastia. Estos son ocasionados por los cambios cíclicos y abruptos (PP/T) que intemperizan a las rocas y contribuye para que el suelo incorpore material pre alterado, debido al tipo de cubierta de vegetal que presentan. Los cambios de coloración que registran los perfiles sugieren la presencia de diferentes grados de oxidación, lo que se infiere por el tipo de mineral de hierro asociado, así como por su abundancia relativa asociada con el cambio en la composición y concentración de los minerales magnéticos de alta coercitividad que presentan los suelos.

En el caso del perfil CR, éste muestra una composición del tipo $Ti(Mgt-Mgh)$ con un bajo contenido de Ti, y en menor proporción Gth y Hmt, además de que presenta un incremento superficial, con una concentración de ferrimagnéticos relativamente intermedia entre el resto de los perfiles, así como un alto contenido de paramagnéticos en una mezcla con una baja abundancia de SP y un mayor contenido de SD y MD, además de tener un contenido moderado de partículas magnéticas duras. La posición del perfil, la escasa cubierta vegetal, y su pobre drenaje permite que el suelo incorpore material pre-alterado que es depositado de las laderas del cráter del volcán, producto de los cambios contrastantes que ocurren en el lugar.

Los perfiles IGFN (1y2) poseen una composición principalmente de $Ti(Mgt-Mgh)$ con bajo contenido de Ti, con una concentración de ferrimagnéticos con menor cantidad de partículas magnéticas duras relativamente similar en una mezcla de dominios magnéticos donde se observan la presencia de partículas $MD \sim (SP+SD)$ secundarias con un bajo contenido de granos SP y un predominio de los SD. El buen drenaje de los perfiles y su cubierta vegetal contribuyen a que la mineralogía magnética se transforme moderadamente, registrándose en el perfil IGF2N un relativo mayor contenido de Ti, mientras que en IGF1N existe un mayor contenido de $Ti(Mgh)$.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

*Capítulo 6:
Discusión (VNT)*

En el caso de los perfiles IGFD (1 y 2) la mineralogía magnética que predomina son las fases de tipo Ti (Mgt-Mgh) con un contenido bajo de Ti, donde el perfil IGF1D presenta un relativo mayor contenido de Ti. Los perfiles muestran un decremento en las partículas ferrimagnéticas y una mezcla en la que coexisten partículas MD secundarias y primarias, pocas cantidades de SP así como una mayor cantidad de los granos SD.

La composición de las partículas magnéticas es heredada del material parental y ésta muestra poca alteración relativamente, ocasionado por las condiciones ambientales y el tipo de cubierta vegetal que origina que las alteraciones en la mineralogía magnética sea más lenta en comparación a las tasas que ocurren el valle y el Glacis. La estacionalidad de ciclos fríos y secos con una mayor humedad indica que junto con el relieve se vean favorecidos los procesos como crioclastia, termoclastía, oxidación/reducción, como los principales mecanismos responsables de controlar la pedogénesis del suelo. Esta hipótesis se ratifica con la presencia de partículas gruesas en los suelos, la escasa presencia de partículas ultrafinas y el predominio de las partículas finas.

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

6.4 Modelo de pedogénesis magnética en suelos volcánicos en México

En este apartado se discute de manera conjunta los resultados del análisis magnético de los perfiles de suelo volcánico como una función de su evolución para poder establecer con ello la firma de una *pedogénesis magnética* que los caracterice. Es decir, en este caso se define como *pedogénesis magnética* a la relación que existe entre la composición de las partículas magnéticas y sus propiedades, con la dinámica de los procesos pedológicos inherentes para cada etapa evolutiva (de forma análoga a la pedogénesis de un perfil). Dichos aspectos son influenciados de manera preponderante por las condiciones ambientales bajo las que se forma cada perfil, mismas que además de regular las tasas de interacción de los procesos pedogenéticos y factores formadores de suelo, también son responsables de controlar la composición del suelo, así como de direccionar su desarrollo y evolución.

Para ello, a continuación se presenta un breve análisis y la discusión del registro de la *pedogénesis magnética* para los suelos de esta investigación. Con esto, se podrá establecer modelos que permitan adquirir información complementaria, como se ha comenzado a realizar recientemente en otras secuencias pedológicas en diferentes aplicaciones como en estudios climáticos (*Wang H. et al., 2016*; etc.), ambientales (p.ej., *Kapicka et al., 2013*; *Jordanova et al., 2014*) y agrícolas (*Jaksik et al., 2016, entre otros*), etc. Para poder realizar dicho análisis los perfiles de este documento se han agrupado en suelos con: a) ciclos cortos, b) moderados y c) largos de pedogénesis respectivamente, de forma análoga como se ha establecido previamente para otras secuencias pedológicas en diversos estudios previos (*Birkeland, 1984*; *Jasso et al., 2006*; *Cabadas, 2007*).

De esta manera, el primer grupo lo integran aquellos suelos de ciclos cortos asociados con una evolución incipiente. En este grupo se han considerado a los perfiles SNP y OTM, ambos Fluvisoles (Región 1-VT), así como a los perfiles CR, IGF1N, IGF2N, IGF1D, IGF2D (Región 3-VNT) todos ellos Regosoles. Conjuntamente ambas etapas presentan una secuencia de horizontes del tipo: A-Ap-AB-AC-C. Con ciclos de pedogénesis largos están los perfiles relacionados con una mayor evolución y desarrollo. Este grupo lo integran los perfiles AHLV (Región 2-GB) Luvisol, y MAS (Región 1-VT) Calcisol respectivamente. Presentan en general una secuencia de horizontes del tipo: Ap-Ah-Bt-Bk-C. Finalmente, para las secuencias pedológicas con ciclos de desarrollo y evolución moderada se ha considerado al resto de los suelos del estudio. Estos comprenden los perfiles CGBE y CGN (Región 1-VT) Cambisoles, así como los perfiles BV (Andosol), AHVT y SUVT (Vertisoles) respectivamente, todos ellos dentro de la región 2, en el Glacis de Buenavista

(GB). De manera generalizada, en su conjunto presentan una secuencia de horizontes del tipo: A-Ap-Ah-AB-AC-Bw-BC.

6.4.1 Pedogénesis magnética de suelos volcánicos de evolución incipiente

En este apartado se lleva a cabo el análisis conjunto de una selección de los esquemas de interacción entre parámetros magnéticos con el objetivo de poder comparar las propiedades magnéticas de suelos con una evolución temprana y su relación con el entorno en el que se desarrollan éstos (**Figura 36**). Para ello, se ha considerado que los Regosoles (VNT) y Fluvisoles (VT) son los suelos de esta investigación que representan un ciclo corto de pedogénesis (Regosol<Fluvisol). El estudio magnético de sus propiedades muestra una agrupación selectiva de los suelos en función con su grado evolutivo, por lo que se les puede asignar una firma magnética a cada etapa evolutiva.

Los Regosoles, desarrollados bajo la cubierta vegetal moderada (pastizales) con una mayor precipitación y menor temperatura ($P_p > 1200$ mm/a, 3.8°C) con respecto a los Fluvisoles ($P_p \leq 604$ mm/a, 16°C , opuntias) son sometidos a un mayor intemperismo físico, mientras que el cambio en los regímenes de los Fluvisoles promueven más las condiciones para un intemperismo de tipo químico.

De acuerdo con el agrupamiento zonal y ordenado de los Regosoles con valores más bajos en χ vs $\chi_{fd\%}$ (**Figura 36a**) y más altos de SIRM_{1T}/χ en el diagrama SIRM_{1T}/χ vs H_{CR} (**Figura 36b**) sugieren que éstos tienen un material compuesto por rocas ígneas ácidas (**Dearing, 1999**), con una mayor concentración de ferrimagnéticos gruesos con respecto a los Fluvisoles. La distribución de los suelos en los esquemas χ vs SIRM_{1T} (**Figura 36c**) indican que las Ti(Mgt), Mgt son el principal mineral magnético, cuya concentración es mayor en los Regosoles comparado con los Fluvisoles. La agrupación de éstos últimos, con una pendiente más suave que relaciona directamente los parámetros magnéticos en los diagramas HIRM_{300} vs S_{300} y S_{100} vs S_{300} sugieren que en éstos la disminución de ferrimagnéticos puede ser el resultado de una mayor oxidación que ocasiona un relativo mayor contenido de Hmt que en los Regosoles (**Figuras 36d,e**).

En el resto de los esquemas, los Regosoles muestran abundantes granos de tamaño grueso que coexisten con finos, controlando ambos la mezcla de dominios magnéticos en comparación con los Fluvisoles (**Figuras 36f-h**).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis Magnética

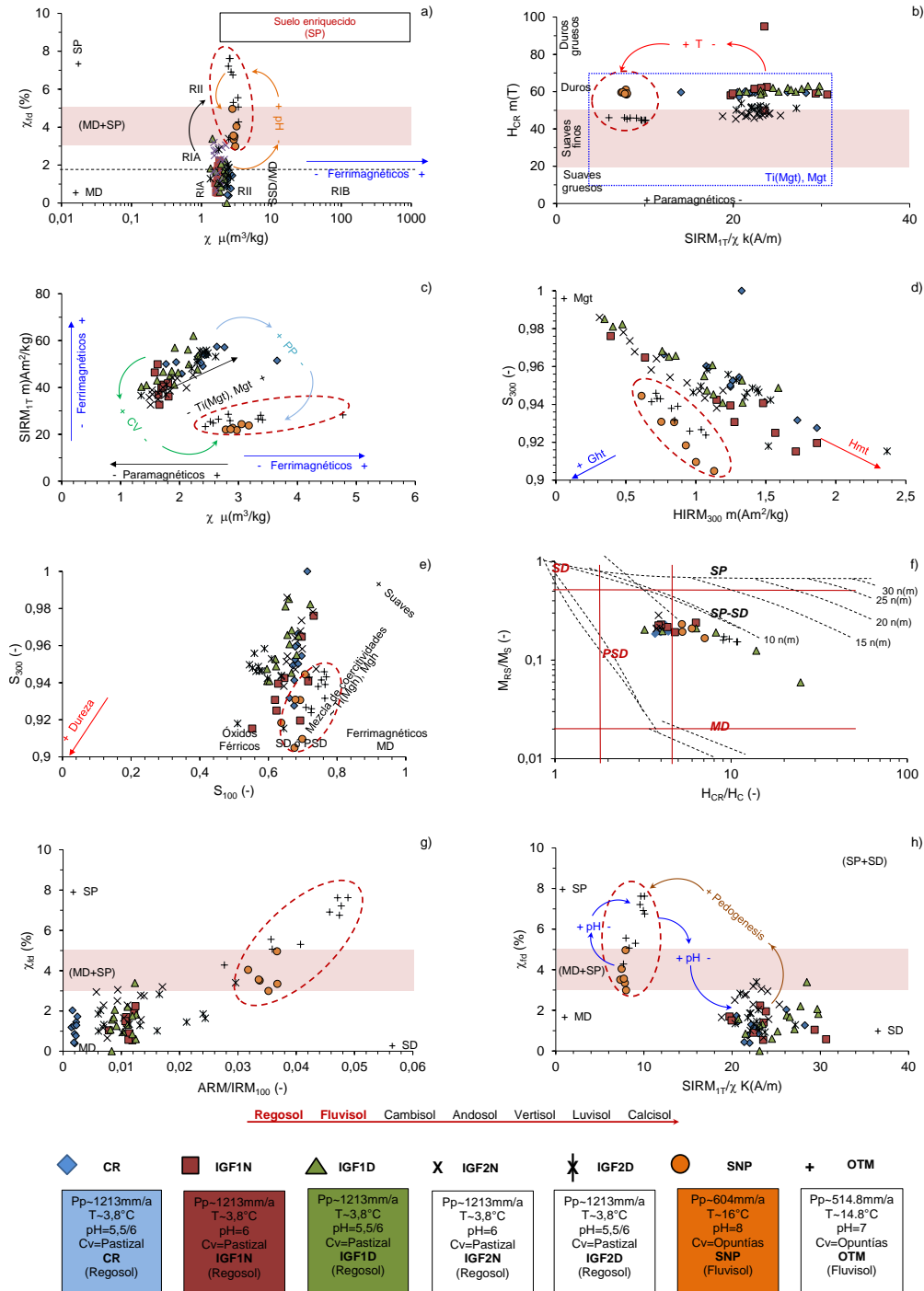


Figura 36.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos con evolución pedológica incipiente. La figura compara los datos de los Regosoles y Fluvisoles (línea discontinua de color rojo). En la parte inferior de la figura se muestra de forma esquemática el grado evolutivo de ambos perfiles (color rojo), con respecto al resto de los suelos analizados en esta investigación (color negro), así como algunas de las características ambientales bajo las que se están desarrollando los suelos. El recuadro de color azul con línea discontinua (gráfico b) denota la presencia de Ti(Mgt), Mgt. Los diagramas se construyen e interpretan a partir de diversos trabajos previos (Thompson y Oldfield, 1986; Robinson, 1986; Stockhausen y Thuoveny, 1999; Dunlop, 2002; Lu Sh., et al 2008; Liu et al 2012, etc).

En éstos, aún hay evidencias del contenido de granos MD (SNP), aunque en menor proporción que en los Regosoles donde éstos son abundantes, registrándose en OTM una mayor contribución de partículas finas y ultrafinas del conjunto de suelos de fase incipiente de este apartado.

La distribución de los suelos en estos diagramas señala que la mayor concentración de ferrimagnéticos se encuentra en los Regosoles moderadamente ácidos (pH~5.5/6), que se asocian con un material ígneo ácido, mismos que se están desarrollando bajo una precipitación alta (1213mm/a) y bajas temperaturas (3.8°C).

Zapata (2004) y Acevedo (2010) establecen que el origen de la acidificación de un suelo puede ser debido a un proceso espontaneo que ocurre durante la pedogénesis, que involucra una continua intemperización química, en la que el suelo pierde cationes/impurezas de elementos alcalinos/alcalinotérreos (K, Ca, Na, Mg), incrementándose los metálicos (Al, Fe⁺³) que pueden sufrir una hidrólisis ácida. La movilidad del Al además de poder ser un factor que interviene en la formación de oxihidróxidos de hierro, es también uno de los mecanismos que influye en las propiedades magnéticas, p.ej., de las Ti(Mgt), lo que se refleja en el desplazamiento de sus T_C en basaltos (Pan *et al.*, 2006; Ekstrom *et al.*, 2010). La sustitución de Al en Gth ocurre continuamente en los suelos y da origen en la naturaleza a Hmt-Al (Taylor 1990; Acevedo *et al.*, 2004)

La alta precipitación (Pp>1200 mm/a) es un agente que favorece que los hidróxidos férricos se precipiten dentro del suelo (por aumento de pH, ó por oxidación del Fe⁺²) como una solución iónica que posteriormente con el tiempo se mineraliza, llegando a estabilizarse el pH del perfil (Taylor 1990; Acevedo *et al.* 2004). La valencia del Fe durante la precipitación condiciona la estructura del cristal del mineral (magnético), si solo hay iones férricos (Fe⁺³) se origina hidroHmt, pero si ocurren iones ferrosos y férricos (Fe⁺², Fe⁺³) se origina la síntesis de Lpc, oxihidróxido de hierro dimorfo de la Gth (Murad y Fischer, 1985; Schwertmann, 1990; Taylor; 1990; Acevedo *et al.*, 2004). De acuerdo con el reporte de (Chiang *et al.*, 1999), la presencia de Gth está vinculada con Lpc bajo condiciones ácidas, que pueden ser minerales precursores de óxidos de hierro dentro de un suelo.

Las bajas temperaturas a las que se someten los suelos (~≤4°C) regulan una baja producción y descomposición de materia orgánica, controlando así los procesos reductores sobre la mineralogía magnética (Jordanova *et al.*, 2011; Liu C. *et al.*, 2012). Otake y colaboradores (2007), han demostrado que se puede presentar una rápida transformación sin oxidación/reducción reversible (Mgt-Hmt-Mgt) en una solución acuosa moderadamente ácida rica en H₂. Dado que, la presencia de Hmt en el suelo suele ser asociada a condiciones de mayor temperatura (~oxidación), aunque puede estar presente en los Regosoles, el espectro de coercitividad variable sugiere la oxidación parcial

de las Ti(Mgt)-Mgt que dan lugar a las Ti(Mgh)-Mgh. La presencia de abundantes granos de dominio magnético grueso refleja una lenta tasa de pedogénesis en los suelos, corroborando la presencia de los minerales de coercitividad media, y que los perfiles aún preservan en parte de las características y propiedades magnéticas del material parental.

Por otro lado la cubierta vegetal de los Fluvisoles es pobre y permite la entrada de material alóctono que se deposita e incorpora al suelo, exponiendo al suelo a la erosión del perfil. El Fe^{+2} es soluble y en condiciones aerobias (exceso de O_2) persiste en el suelo, cuando existe déficit (falta de O_2) éste se oxida y precipita como Fe^{+3} (*Scheinost y schwertmann 1999; Acevedo et al., 2004*).

Varios autores establecen que a medida que se incrementa la temperatura del entorno en el que se desarrolla un perfil pedológico, también lo hace la rapidez con la que la M.O. se descompone, porque la presencia de óxidos férricos en un suelo está vinculando frecuentemente con un entorno cálido (*Porta y López, 1994; Balsam et al., 2004*; entre otros). Reportes previos señalan que un suelo con un pH neutro, permite la oxidación de Fe^{+2} , con cambios ligeros en el porcentaje de oxidación (concentración de Fe y temperatura) que pueden dar lugar a Gth y/ó Hmt ya sea como precursor y/ó resultante de Lpc, Mgt, Mgh, Ferr, mientras que con un pH moderadamente alcalino (~8) favorece un ambiente estable para el Fe^{+3} presente en el suelo (*Bodek et al., 1988; Acevedo et al., 2004; etc*).

De ahí que el aumento en el régimen de temperatura de los Fluvisoles con respecto a los Regosoles, influye junto con el cambio a una cubierta vegetal más pobre (opuntia), en el tipo de M.O. vinculada a ésta. De acuerdo con Acevedo y colaboradores (2004) el tipo de M.O. muestra un rol importante en la formación de óxidos de hierro en el suelo, debido a que puede regular diversos mecanismos como la actividad biológica asociada, ó la formación de compuestos estables con centro metálico (quelatos metálicos) que la modifican. La distribución de los Fluvisoles en $\text{SIRM}_{\text{IT}}/\chi$ vs H_{CR} sugiere que éstos, además de tener una menor concentración de ferrimagnéticos con respecto a los Regosoles, provienen de un material ígneo intermedio, con un incremento relativo de paramagnéticos (Px, Ambf, etc). Murad y Fischer, (1985) así como Acevedo y colaboradores (2004) señalan que los minerales ferromagnesianos constituyen una fuente de Fe para el suelo.

6.4.2 Pedogénesis magnética de suelos volcánicos

de evolución moderada

Para esta sección, se ha considerado que los Cambisoles (CGBE, CGN) del valle (Región 1-VT), así como los Vertisoles (AHVT, SUVT) y el Andosol (BV) del glacis (Región 2-GB), como aquellos perfiles que son representativos de los ciclos intermedios de pedogénesis magnética asociado con una evolución pedológica moderada (Cambisol<Andosol<Vertisol).

Al igual que en la sección previa, los diagramas entre parámetros magnéticos utilizados para el análisis comparativo de estos suelos también muestran un claro ordenamiento diferencial que permite agruparlos conforme al grado evolutivo que ha desarrollado cada uno de ellos (**Figura 37**). De hecho, los resultados permiten diferenciarlos magnéticamente (incluso entre etapas con la misma evolución), resaltando así la sensibilidad de los parámetros magnéticos a las condiciones ambientales bajo las que se desarrollan los perfiles.

La distribución de los Vertisoles (GB, 23.1°C, 1033/967mm/a, pH=6, pastizal) en el diagrama χ vs $\chi_{fd\%}$ (**Figura 37a**), indica que éstos provienen de rocas ígneas moderadamente ácidas, con un predominio de partículas gruesas. La estrecha similitud en la agrupación que ocurre entre los Cambisoles (VT, 12°C, 800/750mm/a, pH=6/7, forestal/opuntia) y el Andosol (GB, 22.3°C, 1213.8mm/a, pH=7, forestal) respectivamente, sugieren que éstos se desarrollan a partir de un material parental más semejante al tipo de rocas ígneas intermedias. De acuerdo con el diagrama, la diferencia entre estas dos últimas fases evolutivas (Cambisol/Andosol) radica en el tamaño de dominio magnético, en donde los Cambisoles aún presentan granos gruesos mezclados con partículas finas, mientras que en el Andosol, los granos finos son lo que más abundan con respecto a los Cambisoles. Los Vertisoles, además de poseer un alto contenido de partículas gruesas, también registran la menor concentración de ferrimagnéticos, así como la mayor contribución de paramagnéticos en comparación con el resto de los suelos (**Figuras 37b-c**). Esto probablemente como resultado de una mayor contribución de $Ti(Mgt)_{+Ti}$ que se encuentran mezcladas con un espectro de coercitividades (Vertisoles), a pesar de las bajas remanencias, con respecto a los Cambisoles y el Andosol, respectivamente. Por el contrario, en estas dos últimas fases de evolución lo que predominan son las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, siendo relativamente mayor y menor contenido de ferri y paramagnéticos respectivamente en los Cambisoles ~ (CGBE >CGN), mientras que en el Andosol, hay una moderada e intermedia concentración de ambos con respecto a los Vertisoles y Cambisoles.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis Magnética

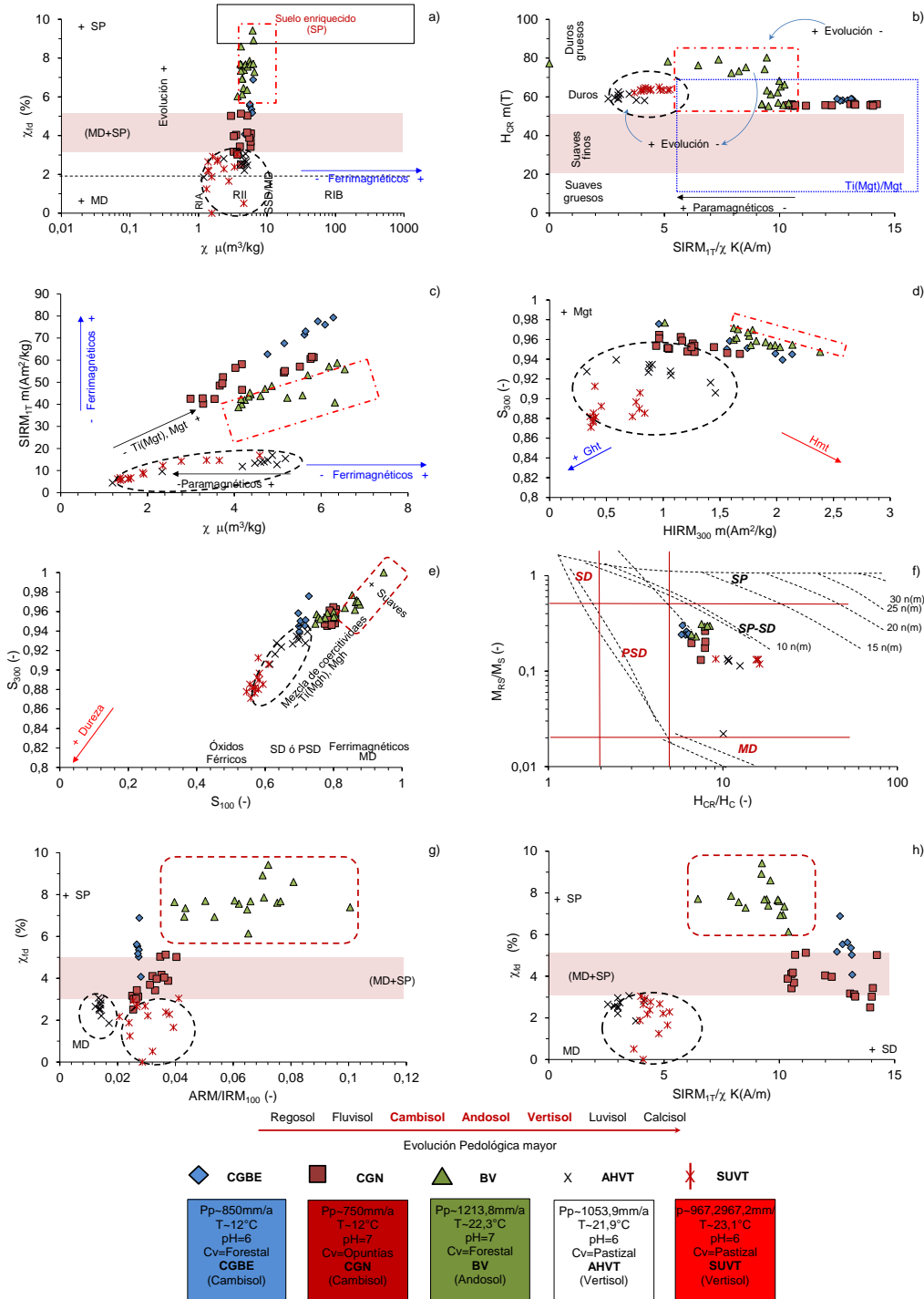


Figura 37.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos con evolución pedológica moderada. La figura compara los datos de los Cambisoles, el Andosol (línea discontinua de color rojo) y los Vertisoles (línea discontinua de color negro), respectivamente. En la parte inferior de la figura se muestra de forma esquemática el grado evolutivo de los perfiles (color rojo), con respecto al resto de los suelos analizados en esta investigación (color negro), así como algunas de las características ambientales bajo las que se están desarrollando los suelos. El recuadro de color azul con línea discontinua (gráfico b) denota la presencia de Ti(Mgt), Mgt. Los diagramas se construyen e interpretan a partir de diversos trabajos previos (Thompson y Oldfield, 1986; Robinson, 1986; Stockhausen y Thuoveny, 1999; Dunlop, 2002; Lu Sh., et al 2008; Liu et al 2012, etc).

Los esquemas $HIRM_{300}$ vs S_{300} y S_{100} vs S_{300} (**Figuras 37d,e**) muestran una similitud en las tendencias de los suelos para asociarse con respecto al gráfico χ vs $\chi_{fd\%}$, en donde los Vertisoles tienen los valores más bajos para los cuatro parámetros magnéticos con respecto al resto de los suelos. El Andosol registra los valores más altos en éstos, mientras que los Cambisoles tienen valores intermedios respectivamente. Esto sugiere que en los suelos existe una mezcla de coercitividades, en donde los Vertisoles poseen un relativo contenido mayor de Gth, mientras que en el Andosol ésta es menor, sugiriendo así que en éste probablemente la contribución de la fracción magnética dura este controlada por Hmt (**Liu Z et al., 2013 entre otros**). En el caso de los Cambisoles, éstos presentarían una concentración de Hmt y Gth relativamente semejante, al estar distribuidos de forma compacta en los esquemas entre el resto de los suelos (**Figuras 37d-e**).

Por otro lado, la asociación de los suelos en el resto de los diagramas refleja una mezcla de partículas magnéticas, diferenciado por el grado de desarrollo y pedogénesis de cada perfil pedológico. Los Vertisoles contienen predominante partículas gruesas, mientras que en el Andosol los granos ultrafinos son los más abundantes (**Figuras 37 f-h**). En los Cambisoles, la mezcla de granos es más heterogénea relativamente, con mezclas de granos MD+SP y abundantes SD (CGN), mientras que en el perfil CGBE contiene abundantes granos SD y un aumento en la concentración de granos SP con respecto al otro Cambisol.

Los diagramas muestran una estrecha relación entre los perfiles (evolución moderada) con las variaciones en las condiciones ambientales, resaltando que los suelos son influenciados más por un intemperismo de tipo químico. El aumento en la temperatura y las variaciones en la precipitación condicionan el desarrollo de la cubierta vegetal del suelo, misma que influye en la formación y concentración de los óxidos de Fe, (**Evans y McElhinny, 1969; Dunlop, 1981; Lu y Liu, 2001**). La cubierta vegetal presenta un papel importante como agente regulador de procesos pedológicos que actúan sobre la mineralogía magnética, así como una cubierta para el suelo que protege a éste de la erosión y/o de la incorporación de material alóctono como ocurre en los Cambisoles, perfiles con la cubierta vegetal más pobre (P.ej., CGN). **Porta y López (1994)** señalan que la rapidez en la descomposición de la M.O. se incrementa al aumentar la temperatura.

Varios autores han establecido que un mecanismo natural de la acidez de un suelo es la hidrólisis de CO_2 asociada con actividad de organismos, así como la de los cationes metálicos, M.O. y los grupos OH^{-1} de los aluminosilicatos (**Zapata, 2004; Acevedo et al., 2010**). De acuerdo con **Nederlof y Riemsdijk (1995)**, la acumulación de iones metálicos en la superficie abiótica de un suelo se relaciona con M.O., arcilla, y oxihidróxidos metálicos. También establecen que ésta es

dependiente del pH, del tipo y concentración de M.O. así como de la acumulación del carbón orgánico disuelto debido a que éstos intervienen en la formación de complejos inorgánicos en solución, lo cual puede incrementar la cantidad de metales en el suelo.

Las características de los Vertisoles en el Glacis de Buenavista (23.1°C, 1033/967mm/a, pH=6, pastizal) reflejan la estacionalidad de ciclos de humedad y sequía que influyen en la composición de la mineralogía magnética, $Ti(Mgt)_{+Ti}$ de grano grueso p.ej., sus propiedades y distribución dentro de los perfiles. Esto sugiere que el suelo se somete a continuos ciclos de expansión/contracción que traslocan material dentro del perfil, provocando continuos periodos de oxidación/reducción con una tasa de lixiviación relativamente moderada que transforma la mineralogía magnética. Esto se refleja en la baja concentración de partículas ferrimagnéticas dentro del suelo, que se transforman en la parte superficial (Mgh, p.ej.), pero con una velocidad baja, que se refleja en la mayor abundancia de los granos gruesos. Autores como Acevedo y colaboradores (2010) establecen que la presencia de cutanes de tipo *slickenside* (rasgo distintivo de los Vertisoles relacionada con arcillas expandibles 2:1) en un suelo se deben a la acumulación de arcilla producto de una alta lixiviación durante la mayor parte del año. Esto es consistente con datos presentados por Díaz (2008) quien reporta que los Vertisoles tienen un alto contenido de M.O. mezcla de arcillas esmec + verm (~semiarido) y caol (~hum), en bloques angulares, considerados todos ellos como un rasgo distintivo de su pedogénesis. También señala que los bajos valores de Feo/Fed <0.4 son un indicador de un intemperismo bajo, con un proceso de humificación reciente, ~1 ka, (Kantor y Schwertmann, 1974; Díaz ortega 2008).

Por otro lado, en los Cambisoles del valle de Teotihuacán, desarrollados bajo condiciones moderadamente más secas (12°C, 800-750mm/a), lo que predomina son las $Ti(Mgt)_{-Ti}$, Mgt, mismas que se encuentran mezcladas con un espectro de coercitidades variable. La diferenciación magnética entre éstos, está más vinculado con la composición y la distribución de la fracción magnética dura, así como en el tamaño de dominio magnético. En el caso de CGBE, (desarrollado bajo una cubierta forestal, 12°C, 800mm/a, pH=6), éste muestra un relativo mayor contenido de Hmt, y una mezcla de granos ultrafinos y gruesos (éstos últimos en baja proporción) con abundantes granos SD, lo cual sugiere un intemperismo intenso. De acuerdo con Fitzpatrick (1978), un suelo desarrollado bajo una cubierta de encino, posee un alto porcentaje de bases debido a la actividad biológica, clima, una descomposición de M.O. rápida con respecto a las coníferas, por lo que liberan más compuestos minerales de la M.O. que se acumulan en la parte superficial del suelo.

Acevedo y colaboradores (2010), reportan que un suelo desarrollado bajo una cubierta forestal, con un pH ácido, posee una alta tasa de M.O. CIC, que se asocia con óxidos de hierro, caolinita/haloisita, y concluyen que el suelo es producto de un intemperismo de un material parental basáltico.

En el perfil CGN, los cambios en las condiciones ambientales bajo las que se desarrolla el perfil (12°C, 750mm/a, pH=7, opuntías) modifican la producción y velocidad de descomposición de la M.O. del suelo, regulando así la interacción de los procesos pedogénéticos en el suelo. Al ubicarse sobre la pendiente del suelo, la pobre cubierta vegetal contribuye a que el suelo incorpore material alóctono al perfil, por lo que las ligeras variaciones en la mineralogía magnética y sus propiedades, con respecto al CGBE son mayores. Varios autores señalan que la modificación antrópica en la cubierta vegetal de un suelo modifica su pH, lo que en su conjunto ocasiona la pérdida de la capa arable del suelo, exponiendo a éste a la erosión especialmente por prácticas de mono cultivo intenso, deforestación y la lixiviación de bases (Zetina *et al.*, 2002; Acevedo *et al.*, 2010).

El sutil cambio en el régimen de precipitación/temperatura asociado con la ubicación y pendiente del terreno puede estar influyendo en la disponibilidad de bases intercambiables (Ca, Mg, K) en el suelo (Acevedo *et al.*, 2010). Reportes previos en GB han establecido la importancia del relieve, altitud y pendiente de un suelo como agentes reguladores de vegetación, el microclima, procesos pedológicos (redox, entre otros) así como el desarrollo del suelo (Guerreo, 2007; Gama *et al.*, 2007), de forma análoga a lo que ocurre entre los Cambisoles (VT), y que en su conjunto modifican la mineralogía magnética del suelo. Acevedo y colaboradores (2004) reportan que bajo un pH neutro ocurre la oxidación de Fe⁺², que puede dar origen a Gth/Hmt ya sea como precursor y resultante de Lpc, Mgt, Mgh, Ferr debido a ligeros cambios en el porcentaje de oxidación, concentración de hierro y temperatura.

Por otro lado, la distribución en los esquemas entre parámetros magnéticos del Andosol del Glacis de Buenavista, desarrollado bajo una cubierta forestal (22.3°C, 1213.8mm/a, pH=7), muestran que éste posee una moderada concentración de partículas ferrimagnéticas y paramagnéticas en comparación con el resto de los suelos de esta sección. El incremento en la temperatura, favorece la formación y descomposición de materia orgánica en el suelo, lo que contribuye al desarrollo del suelo y a la transformación de la mineralogía magnética y sus propiedades. Al igual que los Cambisoles, provienen de un material de tipo roca ígnea intermedia,

pero a diferencia de éstos, poseen una mayor abundancia de granos de dominio ultrafino y fino, lo que sugiere una pedogénesis más rápida e intensa relativamente.

Varios autores han establecido que un suelo que se desarrolla bajo una cubierta vegetal de coníferas puede incrementar la acidez del suelo, lo que altera los procesos edáficos, aumentando la hidrólisis ácida, así como la lixiviación de cationes básicos (*Porta et al., 1999; Lilienfien et al 2000; Acevedo et al., 2010*), lo cual puede ser uno de los mecanismos que originan la baja señal magnética en la parte superficial de los suelos. De acuerdo con Acevedo y colaboradores (*2010*), en un suelo forestal la capacidad de intercambio catiónico es afectado por el contenido de M.O, lo que contribuye a la presencia minerales de rango corto (p.ej., Ferr) y los contenidos en arcilla (*Li et al., 1998*). Solleiro y colaboradores (*2015*) señalan que los minerales de corto rango son producto del intemperismo de material volcánico de tipo pómez y vidrio, que con el tiempo los amorfos cristalizan a haloisita, esmectita y caolinita, los cuales tienen menos capacidad para estabilizar los componentes húmicos, por lo que la M.O. decrece.

Los óxidos de hierro son susceptibles de cambiar valencia y formar complejos con varios productos orgánicos y minerales formando compuestos estables con un centro metálico, quelatos metálicos, (*Acevedo et al., 2004*). Varios autores establecen que la liberación de hierro en los minerales del suelo puede ocurrir por dos mecanismos: 1) la oxidación y transformación en Fe^{+3} y, 2) las movilizaciones de Fe^{+2} siempre que el medio carezca de O_2 , análogo a lo que contemplan otros autores para las Ti(Mgt) (*Acevedo et al., 2004; Jordanova et al., 1997*, etc). El Fe^{+2} es soluble y persiste en el suelo en condiciones aerobias (exceso de O_2), cuando hay déficit se oxida y precipita como Fe^{+3} (*Scheinost y Schwertmann 1999*). Diversos autores establecen que ante la presencia de O_2 y con un pH mayor a 3.5, se oxida a Fe^{+3} precipitándose a hidroHmt de baja solubilidad, considerando que durante la oxidación la solubilidad del hierro se modifica (*Ford, 1984*). En el suelo bajo condiciones de un pH neutro, la oxidación de Fe^{+2} registra cambios ligeros la concentración de Fe y temperatura, lo que influye en la tasa de oxidación, lo que pueden dar lugar a Gth/Hmt ya sea como precursor y producto de Lpc, Mgt, Mgh, Ferr (*Acevedo et al., 2004*).

Solleiro y colaboradores (*2015*) indican que un Andosol es estable durante los primeros 5Ka cuando el material parental aun contiene minerales que dan origen al alofano, el cual al cristalizar a haloisita y caolinita (*Shoji et al., 1993*), constituye el principal mecanismo que da lugar a la evolución de los suelos volcánicos, siendo factores como la composición del vidrio volcánico, tamaño de grano, porosidad y forma de las vesículas de la pómez, pH y temperatura del suelo agentes que regulan la tasa de evolución del suelo. Debido a la concentración y distribución de las

partículas magnéticas en el suelo, los resultados sugieren que el suelo ha rebasado dicho límite, indicando que la transformación de la mineralogía magnética ha sido intensa, al predominar los granos finos y ultrafinos, con la concentración de paramagnéticos más baja de este grupo de suelos analizados en este apartado.

6.4.3 Pedogénesis magnética de suelos volcánicos de evolución avanzada

Para el análisis comparativo de los parámetros magnéticos en los ciclos largos de evolución de esta sección (**Figura 38**), se han considerado a los perfiles MAS (Calcisol) de la región 1 (VT), así como al perfil AHLV (Luvisol) en la región 2 (GB). Al igual que en los diagramas de las secciones previas, para la pedogénesis magnética de los suelos con evolución incipiente y moderada (**Figuras 36,37**), en este apartado también se observan que los suelos tienden a agruparse selectivamente de acuerdo a su etapa de desarrollo (Calcisol~Luvisol). La diferencia en las condiciones ambientales entre los suelos con etapa avanzada está vinculado con la composición y distribución de la mineralogía magnética y sus propiedades para cada perfil.

En el caso del Calcisol desarrollado bajo condiciones relativamente más secas (16°C, 604mm/a, pH=8, cultivo) con respecto al Luvisol (21.9°C, 1053mm/a, pH=7, pastizal) los resultados sugieren que aunque en ambos perfiles las condiciones favorecen la acción de un intemperismo químico, éste ocurre a una tasa comparativa y relativamente más débil en MAS con respecto a AHLV respectivamente. La distribución de los suelos en los diagramas entre parámetros magnéticos (**Figura 38**) señalan que los suelos provienen de un material parental del tipo de rocas ígneas intermedias, en donde el Calcisol aún conserva granos gruesos mezclados con una baja concentración de partículas ultrafinas en comparación con el Luvisol, en donde éstas son más abundantes (**Figura 38a**).

De acuerdo con los diagramas $SIRM_{1T}/\chi$ vs H_{CR} , χ vs $SIRM_{1T}$, lo que predomina en los suelos son las bajas concentraciones de partículas ferrimagnéticas, Ti(Mgt)-Mgt, en donde el contenido de paramagnéticos es sutilmente más alto para el Luvisol (**Figuras 38b-c**). La tendencia inversa registrada en los esquemas $HIRM_{300}$ vs S_{300} y S_{100} vs S_{300} de los suelos sugiere que las ligeras diferencias entre los perfiles magnéticos de etapas evolutivas están en función de la composición/distribución del espectro de la fracción magnética dura (**Figuras 38d-e**).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis Magnética

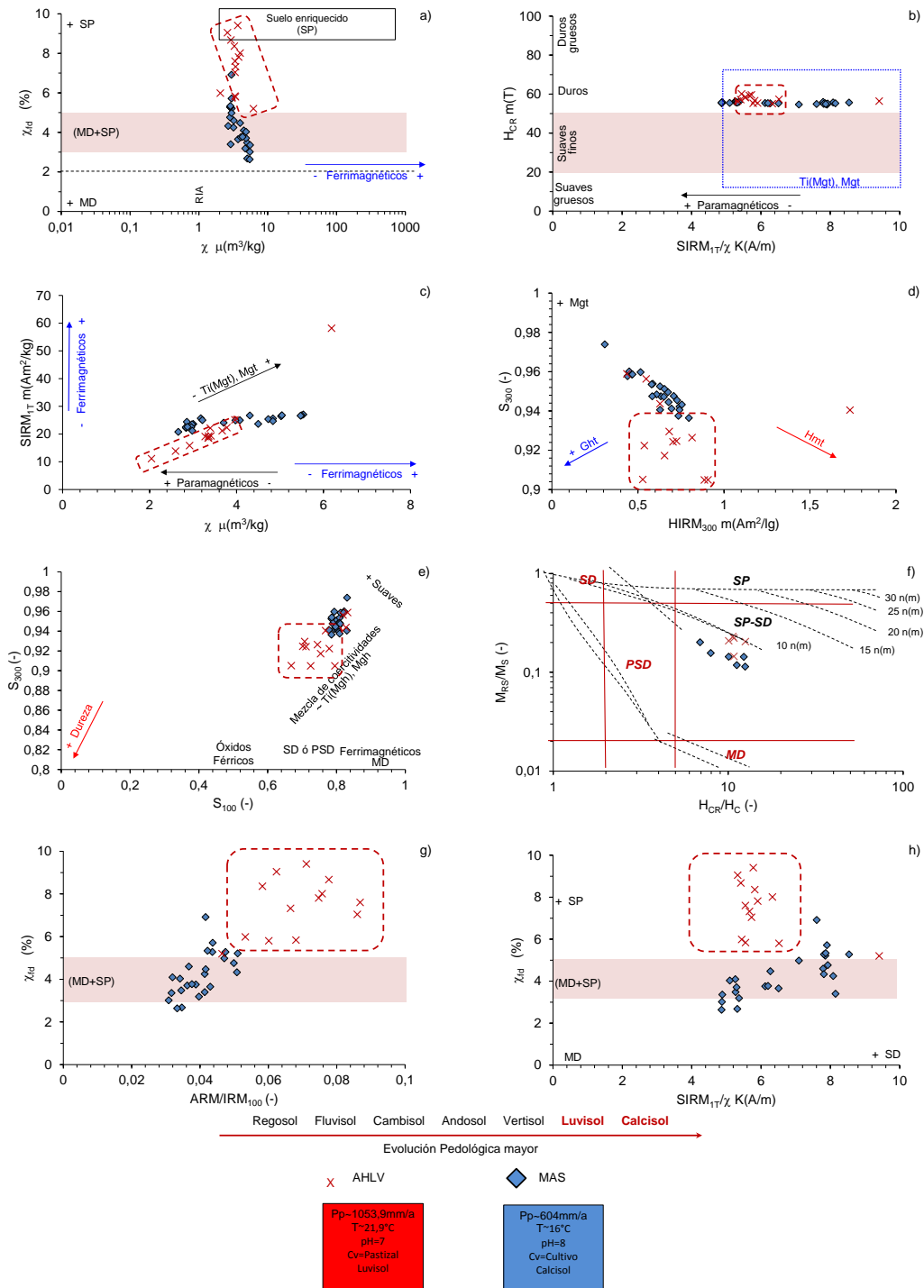


Figura 38.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos con evolución pedológica avanzada. La figura compara los datos del Luvisol (línea discontinua de color rojo) y el Calcisol. En la parte inferior de la figura se muestra de forma esquemática el grado evolutivo de ambos perfiles (color rojo), con respecto al resto de los suelos analizados en esta investigación (color negro), así como algunas de las características ambientales bajo las que se están desarrollando los suelos. El recuadro de color azul con línea discontinua (gráfico b) denota la presencia de Ti(Mgt), Mgt. Los diagramas se construyen e interpretan a partir de diversos trabajos previos (Thompson y Oldfield, 1986; Robinson, 1986; Stockhausen y Thuoveny, 1999; Dunlop, 2002; Lu Sh., et al 2008; Liu et al 2012, etc).

La agrupación del Luvisol en dichos gráficos sugiere que en éste existe una relativa mayor contribución de partículas de baja coercitividad en comparación con el Calcisol, sugiriendo que en AHLV hay un mayor contenido de Gth y Mgh, con respecto a MAS. El resto de los diagramas resaltan la agrupación selectiva de los suelos de acuerdo con su grado de pedogénesis, en donde el Luvisol se caracteriza por tener una transformación del suelo más rápida e intensa (alta concentración de granos SP y SD), en comparación con el Calcisol (SD abundantes y la mezcla de MD+SP ~MD>SP) respectivamente (**Figuras 38f-h**)

Los diagramas entre los parámetros magnéticos muestran que en el Luvisol (desarrollado bajo un régimen de precipitación/temperatura relativamente más alto con respecto al Calcisol-MAS) a pesar de contener Ti(Mgt) como la principal fase magnética en el suelo (AHLV), su abundancia es ligeramente menor en comparación con el perfil MAS. La mezcla de dominios magnéticos es controlada por abundantes partículas finas y ultrafinas, lo que sugiere una continua e intensa transformación del suelo y de su mineralogía magnética. Esto es congruente con los valores bajos registrados en la relación limo/arcilla del suelo, corroborándose también con la baja concentración de granos ferrimagnéticos, que permite inferir la presencia de un alto contenido de partículas magnéticas duras. El análisis de los diagramas también es consistente con los trabajos de Díaz (2008) y Solleiro y colaboradores (2015), en el que señalan que para su evolución, el perfil AHLV ha estado sujeto a un fuerte intemperismo, debido al material parental del Glacis (rico en arcilla producto de la actividad hidrotermal) que junto con la erosión y transporte de material pre-alterado, acelera la pedogénesis del suelo.

Algunos autores han establecido que el tipo de cubierta vegetal influye en la formación y concentración de los óxidos de hierro en el suelo, y que a mayor temperatura se incrementa la rapidez con la que la M.O. se descompone (Evans y Mcelhinny, 1969; Dunlop, 198; Porta y Lopez, 1994; Lu y Liu, 2001). Reportes previos también consideran que es posible que coexistan simultáneamente dimorfos de óxidos/oxihidróxidos férricos (Hmt/Mgh, y/ó Gth/Lpc) en la naturaleza y ser detectados por el análisis de parámetros magnéticos (France y Oldfield, 2000; Acevedo et al., 2004; Su et al., 2015). De acuerdo con diversos autores, (Murad y Fisher, 1985; Schwertmann, 1990; Taylor; 1990, p.ej.), durante la precipitación del hierro, su valencia es responsable de controlar la estructura del cristal, y establecen que en presencia de iones férricos (Fe^{+3}) éstos dan lugar a hidroHmt, mientras que la coexistencia de iones ferrosos y férricos (Fe^{+2} , Fe^{+3}) puede originar la síntesis de Lpc (oxihidróxido de hierro polimorfo de Gth), que en pequeñas concentraciones puede coexistir con Gth (Chiang et al., 1999). El hidróxido férrico se debe a la

oxidación del hierro (Fe^{+2}) y su posterior precipitación que se mineraliza con el tiempo (**Acevedo et al 2004**). En condiciones aerobias, los óxidos de hierro son compuestos inmóviles de baja solubilidad de colores amarillo rojizos, mientras que en condiciones anaeróbicas, pueden ser solubilizados por actividad biológica, en donde el hierro (II) móvil se desplaza a zonas aerobias donde es oxidado y neoforma nuevos minerales (Hmt, Gth, Lpc, Mgh, y Ferr), distribuyendo heterogéneamente los FeO, mientras que en condiciones aerobias es más homogénea.

Por otro lado, en el caso del perfil MAS (Calcisol), desarrollado bajo condiciones más áridas (16°C , 604mm/a) con respecto al Luvisol (AHLV), se forma a partir de un material de composición relativamente más básica. Esto se refleja en un sutil aumento en la concentración de ferrimagnéticos así como en la modificación en la composición de la fracción magnética dura, misma que sugiere un relativo incremento en la concentración de Hmt. A diferencia del Luvisol, de acuerdo con la distribución de los diagramas entre parámetros magnéticos, en MAS se registra una mezcla de dominios magnéticos caracterizada por la mezcla de granos MD+SP (bajos éstos últimos) con un contenido de moderado a alto de los granos SD.

La distribución del Calcisol en los diagramas (**Figura 38**), al igual que en el resto de los suelos de este documento, está vinculado estrechamente con las variaciones de sus perfiles magnéticos (**Figura 17**). En su conjunto, éstos permiten inferir que en MAS existe una gradual transformación de la mineralogía magnética de manera cíclica que se puede asociar con variaciones en las condiciones de humedad, relativamente más cortos y contrastantes en la parte baja ($\sim\chi_{fd\%}$ p.ej.). A diferencia del Luvisol, el contenido de CaCO_3 en el suelo (Calcisol) ampliamente documentado y estudiado previamente (**Cabadas, 2004 y 2007 p.ej.**), puede ser uno de los factores que influyen en la concentración y distribución de partículas magnéticas en el suelo. De acuerdo con Gama y colaboradores (**2000**), la alcalinidad de un suelo favorece la dispersión de arcillas en el suelo, mientras que Taylor (**1990**) señala que la precipitación del hierro a partir de una solución iónica ocurre por el aumento de pH ó por la oxidación de Fe^{+2} en solución, aspectos ocurren dentro del suelo. Feng y colaboradores (**2004**) entre otros, señalan que la presencia de CaCO_3 en el suelo le proporciona un efecto amortiguador al registro magnético, interpretando que éste excede a la tasa de disolución. Varios autores previamente han establecido que en suelos que contienen CaCO_3 , durante el lavado del mismo contribuyen con la movilidad del hierro en el suelo, acumulándose inmediatamente, e incluso que puede llegar a ocurrir en un horizonte alterado (con un aumento magnético superficial) en caso de que el lavado de los carbonatos no sea superficial (**Feng et al., 2004; Lu Sg et al. 2012**).

6.5 Pedogénesis magnética de suelos volcánicos con aumento magnético superficial

A diferencia de los primeros reportes previamente realizados en México en suelos volcánicos desde una perspectiva magnético/pedológica/ambiental, (p.ej., *Rivas 2003 y 2006, Ortega et al., 2004*) en algunos de los suelos de esta investigación se registra un aparente aumento ó realce de susceptibilidad magnética superficial, *RMS*, (*Figuras 16, 19, 24, 25 y 28*), el cual ha sido reportado y estudiado ampliamente con anterioridad en las mayoría de las secuencias de loess-paleosuelos (*Liu et al., 2007; Jordanova et al., 2011*) así como en suelos eólicos fundamentalmente (*Anderson y Hallet, 1996; Rivas et al., 2006; Bartel et al., 2011*). No obstante, que recientemente dicho aumento también se ha comenzado registrar en secuencias pedológicas del país, inclusive dentro de una misma región con registros de precipitación y temperatura similares (*p.ej., Salcido, 2012*), su origen no se ha analizado a detalle (comparativamente como en las secuencias de loess-paleosuelos), ni se ha discutido su origen desde una perspectiva magnético-pedológico-ambiental.

Incluso en ésta investigación se ha observado que además de registrarse en algunos de los perfiles, puede y no estar presente de manera conjunta en suelos con una misma evolución pedogenética fundamental bajo condiciones ambientales similares (p.ej., Cambisoles, *Figura 15-16*), ó estar presente sin importar el *estadio/carácter* del perfil, es decir que se trate de un suelo volcánico moderno ó antiguo (Vertisoles., *Rivas et al., 2012; Sánchez, 2015*). Esto difiere, aunque no por completo, con el esquema propuesto anteriormente en los estudios de magnetismo de rocas para suelos volcánicos en México con algunas evoluciones pedogenéticas similares y análogas a las que desarrollan algunos de los perfiles pedológicos de ésta investigación (*Rivas 2003 y 2006*). En ellos, se plantea que los suelos volcánicos antiguos se caracterizan por mostrar, como una firma magnética propia, la ausencia de un realce magnético, que los distinguía de los suelos de origen eólico. Es decir, que los suelos volcánicos antiguos registraban los valores más bajos (χ) en la parte superficial y se incrementan hacia el fondo del mismo (*Ortega et al., 2004; Rivas et al., 2006*). De ahí que una posibilidad para que esto ocurra se debe a la estabilidad que alcanzan los suelos volcánicos antiguos con el tiempo para tener un equilibrio en su pedogénesis, así como una mayor estabilidad del paisaje. Esto a su vez, influye en la composición de su mineralogía magnética que no se alcanza a modificar por completo con las variaciones ambientales recientes con las que interactúan estos suelos volcánicos antiguos.

Por eso, a partir del análisis detallado realizado en la presente investigación, y con un mayor control de algunos aspectos ambientales (precipitación, temperatura, cubierta vegetal, etc.),

se lleva a cabo también el estudio selectivo de algunos de los parámetros magnéticos para ser analizados de una manera integral y poder establecer el rol del ambiente en el que se desarrolla cada suelo con la pedogénesis del aumento magnético superficial (*RMS*) de cada perfil, su influencia sobre las propiedades magnéticas y los mecanismos que le dan su origen.

En este documento, los suelos que presentan esta característica (*RMS*) se relaciona con etapas de pedogénesis corta como en el Regosol, CR/VNT (*Figura 28*) y el Fluvisol, OTM/VT (*Figura 19*), y en etapas intermedias de pedogénesis como en el Cambisol, CGN/VT (*Figura 16*) y los Vertisoles, AHVT y SUVT, ambos en GB (*Figuras 24,25*) respectivamente (*Tabla 14*). En general, estos suelos (*RMS*) poseen una secuencia conjunta y combinada de horizontes de tipo A-Ap-Ah-AB-AC-BC-C, considerándose que su distribución evolutiva de menor a mayor grado es: Regosol<Fluvisol<Cambisol<Vertisol, abarcando etapas de pedogénesis incipientes y moderadas.

El análisis de la interacción entre parámetros magnéticos de los suelos resalta la agrupación selectiva que tienen éstos, cuya distribución se relaciona con la etapa evolutiva (*Figura 39*). Esto puede ser un indicativo del grado de enriquecimiento de las partículas magnéticas en el suelo, perspectiva hacia donde se han comenzado a centrar con más frecuencia recientemente los estudios de magnetismo ambiental (*Liu Z., et al., 2013; Ni et al., 2015*; entre otros), y que se discute con un poco más de detalle para los suelos volcánicos de este documento a continuación.

De acuerdo con los diagramas, los suelos presentan una estrecha relación entre los cuatro parámetros χ vs $\chi_{fd\%}$ y $SIRM_{IT}/\chi$ vs H_{CR} en donde el Regosol, CR (3.4°C, 1213mm/a, pH~5.5/6, pastizal) y los Vertisoles, AHVT/SUVT (22.3/23.1°C, 1033/967mm/a; pH=6, Pastizal) provienen de un material del tipo de roca ígnea ácida, con abundantes partículas gruesas (*Figuras 39 a, b*) resalta que los Vertisoles contienen el mayor aporte de paramagnéticos, Ti, mientras que el Regosol posee la menor, ambos casos con respecto al resto de los suelos de este apartado. En el caso del Cambisol, CGN (12°C, 750mm/a, pH=7, opuntía) y el Fluvisol, OTM (14.8°C, 514.3mm/a, pH=7, opuntía), ambos provienen de un material de tipo roca ígnea intermedia, con una mayor abundancia de granos finos con respecto a los perfiles previamente descritos. Sobresale la similitud en su contenido de paramagnéticos, relativamente alta y próxima a la de los Vertisoles (*Figura 39c*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis Magnética

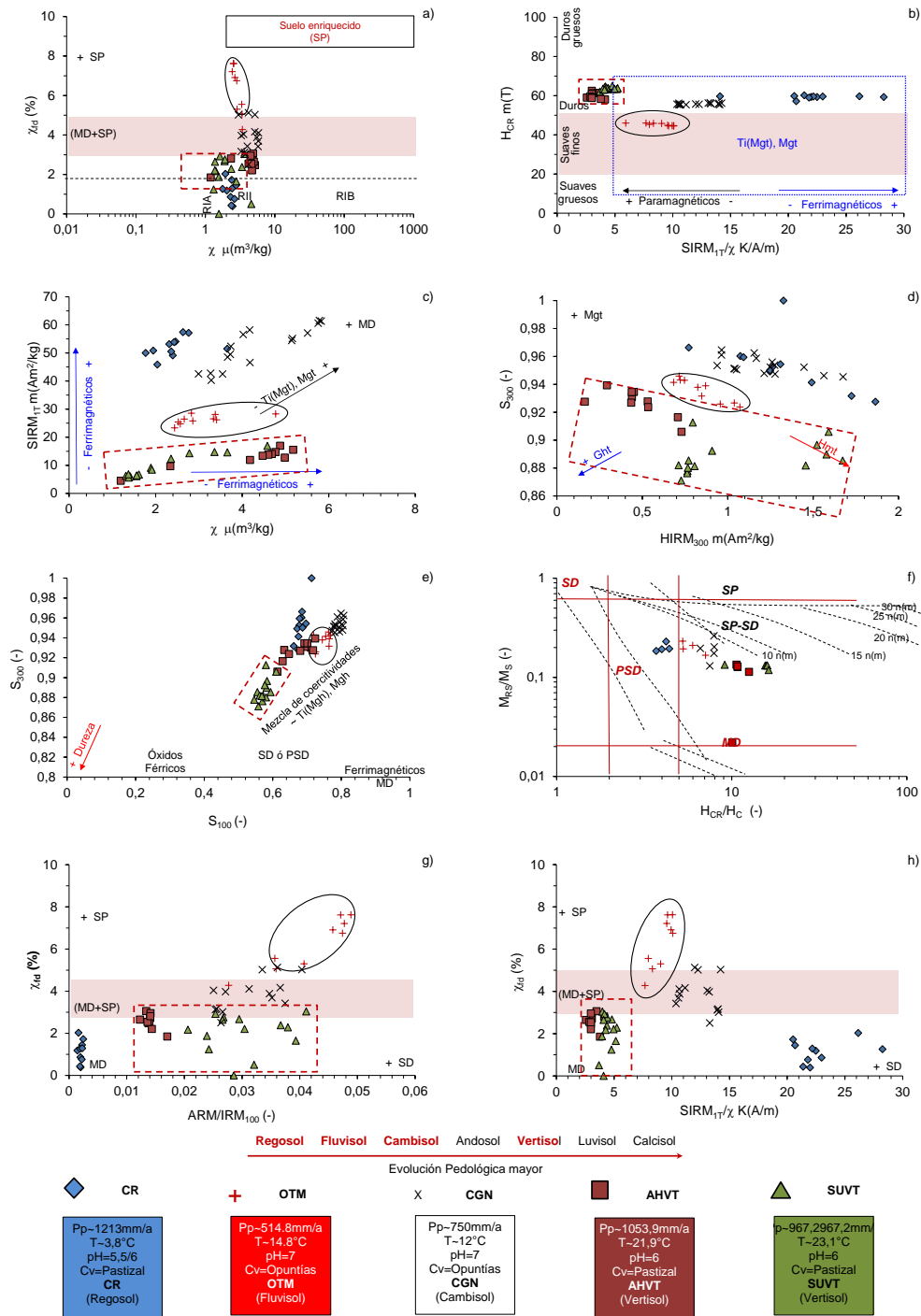


Figura 39.- Relación entre parámetros magnéticos de los suelos con un realce magnético superficial. La figura compara los datos del Regosol, Fluvisol (línea discontinua de color negro), Cambisol, y Vertisoles (línea discontinua de color rojo). En la parte inferior de la figura se muestra de forma esquemática el grado evolutivo de ambos perfiles (color rojo), con respecto al resto de los suelos analizados en esta investigación (color negro), así como algunas de las características ambientales bajo las que se están desarrollando los suelos. El recuadro de color azul con línea discontinua (gráfico b) denota la presencia de Ti(Mgt)/Mgt. Los diagramas se construyen e interpretan a partir de diversos trabajos previos (Thompson y Oldfield, 1986; Robinson, 1986; Stockhausen y Thuveny, 1999; Dunlop, 2002; Lu Sh., et al 2008; Liu et al 2012, etc).

El ordenamiento selectivo de los suelos en ambas figuras muestra la relación directa entre la acidez del suelo ($\text{pH}=7$) con el tipo de cubierta vegetal (opuntia) y la precipitación (750/514mm/a) p.ej., en el diagrama χ vs $\chi_{fd\%}$, así como el papel de la temperatura con el contenido de impurezas (SIRM_{1T}/χ vs H_{CR}).

Los esquemas χ vs SIRM_{1T} (**Figura 39c**) y S_{100} vs S_{300} (**Figura 39e**) tienen una agrupación selectiva de los suelos similar entre sí, y relativamente análoga a la que se observa en los gráficos previamente descritos (ordenamiento de los suelos en función de SIRM_{1T}/χ , **Figura 39b**, P.ej.). En el primer gráfico, se observa la relación directa entre los parámetros magnéticos, con una pendiente más suave se ubican a los Vertisoles, mientras que en el extremo opuesto con una pendiente relativamente más abrupta se encuentran los Regosoles, lo que sugiere que en éstos últimos existe una mayor concentración de $\text{Ti}(\text{Mgt})$, mientras que en los Vertisoles ésta es menor con un mayor contenido de Ti . Esto es consistente con el cambio en el espectro de coercitividades de mayor dureza (relación inversa entre parámetros, **Figura 39d**) que sugieren que en los Vertisoles, en comparación con el Regosol, poseen también una mayor concentración de Mgh y Gth . El perfil SUVT posee un relativo aumento en la concentración de Hmt con respecto al perfil AHVT.

Con respecto a la distribución del resto de los perfiles (CGN/Cambisol, OTM/Fluvisol) el agrupamiento en los diagramas de éstos dentro de una región intermedia, delimitada por los extremos entre el Regosol y los Vertisoles (**Figuras 39c-e**), sugiriendo una mezcla más homogénea en el contenido de $\text{Ti}(\text{Mgt-Mgh})$, Gth , Hmt y Mgh . Resalta la clara diferenciación de los suelos en función del tipo de cubierta vegetal (opuntia vs pastizal), lo que es más evidente en los diagramas HIRM_{300} vs S_{300} y S_{100} vs S_{300} (**Figuras 39 d,e**).

En el resto de los esquemas entre parámetros magnéticos los suelos tienden a agruparse de forma similar y consistente, observándose que el Regosol (CR) es el suelo con una mayor cantidad de granos gruesos, mientras que en el Fluvisol (OTM) éstos son mínimos, siendo la mezcla controlada por una mayor concentración de partículas ultrafinas (**Figuras 39 f-h**). El Cambisol (CGN) se ubica dentro de los diagramas entre los extremos definidos por CR y OTM, sugiriendo que en éste aún existe la presencia de granos gruesos.

En el caso de los Vertisoles (AHVT, SUVT), éstos se ubican por debajo de la tendencia principal de los suelos a ordenarse sobre una diagonal que vincula la distribución del tamaño de dominio magnético de cada suelo con el grado evolutivo del suelo y la precipitación pluvial con la distribución de la fracción magnética dura respectivamente.

En ese sentido, difieren del ampliamente reportado aumento magnético superficial (RMS) característico de secuencias pedológicas de origen eólico (*Fine et al., 1995; Singer et al., 1996; p.ej.,*) en diferentes estadios (secuencias modernas ó antiguas). De manera general, en la literatura éste se ha definido como el incremento en la parte superficial de los parámetros magnéticos, en especial de la susceptibilidad (*Le Borgne, 1955; Thompson y Oldfield, 1986*) debido a la presencia de Mgt/Mgh secundaria de grano finos y ultrafinos producto de la transformación de varias fases como Mgt, Ferr entre otras por diversos procesos como detritos antrópicos (*Strzyszcz et al., 1996;* etc), transformación termal (*Kletestchka y Banerjee, 1995;* entre otros), origen in situ de carácter inorgánico (*Maher y Taylor, 1988*), actividad bacteriana (*Lovely et al., 1987*), así como por la alteración producto del intemperismo por variaciones cíclicas de humedad (*Schwertmann 1988, y 1988b; Dearing et al., 1996*).

La caracterización de los perfiles magnéticos de los suelos con un aumento magnético superficial (RMS) de esta investigación son descritos con mayor detalle en las secciones previas y de la relación entre parámetros magnético. De manera general, dicho incremento es controlado por las condiciones específicas del suelo (*Tabla 14*), siendo factores como el material parental y el clima, dos de los aspectos que más influyen en la magnitud de la señal magnética de éstos perfiles.

En ese sentido, el mayor registro magnético de este conjunto de suelos (RMS) está relacionado con el Regosol (CR), que a pesar de tener la precipitación más alta, su baja temperatura ocasiona una tasa de transformación de la mineralogía primaria del suelo más lenta, por lo que a pesar de recibir material pre alterado incorporado al suelo, el carácter incipiente del suelo es más de tipo litogénico.

De acuerdo con los resultados, las condiciones del entorno de los suelos intervienen en la tasa de aumento magnético superficial de cada uno, su grado de pedogénesis, por lo que influye de manera selectiva sobre el desarrollo de cada perfil, su mineralogía magnética y propiedades para cada suelo, lo que refleja el grado de estabilidad que va alcanzando cada etapa evolutiva, lo que se ratifica al estar en etapas incipientes y moderadas bajos características particulares.

La siguiente etapa con la firma magnética más intensa corresponde al Cambisol (CGN), que además de también recibir el aporte de material pre-alterado dentro del perfil (similar a lo que ocurre en CR) contiene una mezcla de dominios magnéticos controlada por granos finos, producto del cambio en la cubierta vegetal y la ubicación del perfil, que sugieren un menor tiempo para desarrollar dicho grado de pedogénesis (aunque aún preserva remanencia de la señal litológica ~ presencia de granos MD).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis Magnética

Tabla 14.- Síntesis de la caracterización de los suelos con realce magnético superficial.

Perfil (Evolución)	Material (Parental)	Fase magnética (Principal)	Fracción magnética (dura)	Principal dominio (magnético)	Pp / T (Valor medio anual)	pH / Cv
CR (Regosol)	RIA	Ti(Mgt) _{-Ti}	Gth/Hmt	MD	3.8°C, 1213mm/a	5.5/6, Pastizal
OTM (Fluvisol)	RII	Ti(Mgt) _{-Ti}	Hmt	SP	14.8°C, 514.8, mm/a	7, Opuntia
CGN (Cambisol)	RII	Ti(Mgt) _{-Ti}	Hmt	SD	12°C, 750 mm/a,	7, Opuntia
AHVT (Vertisol)	RII	Ti(Mgt) _{+Ti}	Gth	MD	22.3°C, 1053mm/a	6, Pastizal
SUVT (Vertisol)	RIA	Ti(Mgt) _{+Ti}	Gth	MD	23.1°C, 967 mm/a	6, Pastizal

La tabla presenta, de manera generalizada y comparativa, conjunto de los aspectos que influyen de forma selectiva y diferida en el incremento superficial de los suelos volcánicos de este documento. De izquierda a derecha las columnas muestran: el perfil y su grado de evolución pedológica (primera columna), el material parental inferido (segunda columna), en donde las siglas RIA y RII significan roca ígnea ácida e intermedia respectivamente, (segunda columna). La tercera columna indica el mineral magnético más abundante, Titanomagnética pobre, Ti(Mgt)_{-Ti}, ó rica, Ti(Mgt)_{+Ti} en Ti, respectivamente. La cuarta columna señala el principal mineral de coercitividad alta que está presente en el suelo (Goethita, Gth ó Hematita, Hmt). La quinta columna indica el dominio magnético predominante en el suelo, granos ultrafinos (SP), finos (SD), gruesos (MD). La sexta y séptima columna indican los valores medios anuales de precipitación (Pp) y temperatura (T), así como la cubierta vegetal (Cv) y registro acidez (pH) respectivamente.

Esto como resultado del cambio en los regímenes de precipitación y temperatura con respecto al Regosol, lo que influye en el tipo de M.O., con una descomposición más rápida de la M.O., afectando a una tasa de intemperismo químico del suelo diferente (*Porta y López, 1994*), De acuerdo con Cabadas (*2004*), el suelo (CGN) se somete al arrastre de materiales por el agua (escurrimiento lateral) por lo que el perfil se encuentra expuesto a la liberación de sus elementos solubles (sílice y bases), así como a la incorporación de material pre-alterado que se incorpora al suelo dada la pobre cubierta vegetal del suelo (*Solleiro et al., 2006*), y que contribuye a la redistribución de la mineralogía magnética y su posterior alteración.

En el caso del Fluvisol (OTM), dado su relativa similitud con respecto a CGN, muestra también una señal acelerada, producto de su propia condición aluvial y su relieve, que en este caso además de contener la mezcla de materiales que dan origen al suelo, la presencia de granos finos y la baja señal con respecto a las etapas previamente citadas, sugiere una menor concentración de los minerales magnéticos con un grado de alteración relativamente mayor con respecto al Cambisol.

Por otro lado, los Vertisoles (AHVT, SUVT) se caracterizan por su material parental diferente, aunque se infiere que provienen de un material parental ácido (RIA) análogo al Regosol, poseen la firma magnética más pobre vinculada con la concentración más baja de ferrimagnéticos, relacionando con Ti(Mgt)_{+Ti}. La presencia de granos MD en los suelos bajo condiciones estacionales con una mayor humedad (Pp < 1053 mm/a) y temperatura (T < 20°C) sugieren una lenta transformación de la mineralogía magnética resultado probablemente de condiciones de mayor

estabilidad del paisaje que dan lugar a procesos de expansión contracción a tasas bajas, probablemente semejantes a lo que ocurre por crioclastia en el Regosol. Datos no magnéticos de trabajos previos son consistentes y ratifican que los Vertisoles poseen una pedogénesis lenta, que se refleja en pobre desarrollo del suelo, así como con ciclos de humedad estacional (*Gama et al., 2007, Díaz, 2008; Díaz et al., 2010*).

6.6 Análisis comparativo entre estadios de la pedogénesis magnética en suelos volcánicos

Este apartado contiene el análisis comparativo de los registros de susceptibilidad magnética, puntual y promedio (χ), la magnetización isothermal remanente de saturación ($SIRM_{1T}$), y la susceptibilidad dependiente de frecuencias ($\chi_{fd\%}$) respectivamente entre algunos de los suelos del presente estudio con secuencias antiguas con la misma unidad pedológica fundamental (**Figura 40a-f**). Los valores más altos (χ) se asocian frecuentemente con aquellos perfiles que se infiere provienen de un MP del tipo RIB y que disminuye conforme se asemeja más a uno de tipo RIA.

La susceptibilidad magnética (χ) es influenciada por la humedad, aunque también es regulada por la temperatura. Es decir, ésta tiende a ser mayor en suelos con $\sim 1000\text{mm/a} \leq Pp$; observándose además que bajo una Pp similar, con Δt , en suelos bajo condiciones de menor temperatura es de carácter litogénico por una menor tasa de desarrollo, mientras que a mayor temperatura, será probablemente por una mayor intensidad de la pedogénesis (**Figura 40a**). Dentro de las regiones con menor humedad, la susceptibilidad es mayor en los climas semi-áridos con respecto a los climas fríos. También se puede observar que a partir del análisis comparativo entre suelos volcánicos modernos y antiguos, a medida que se incrementa la evolución pedogenética de un perfil, se incrementa su registro de susceptibilidad magnética, tanto para los suelos de esta investigación como en trabajos previos. La interacción de los parámetros seleccionados se utiliza frecuentemente como una fuente de información para inferir el material parental y grado de pedogénesis del suelo $\sim f$:(concentración/dominio de las partículas magnéticas) a través del diagrama χ vs $\chi_{fd\%}$ (*Dearing, 1994*) así como de la composición $\sim f$:(concentración) de las partículas magnéticas contenidas en éstos (**Figuras 40b-d**), por medio del diagrama χ vs $SIRM_{1T}$ (*Thompson y Oldfield, 1986*), (**Figuras 40 e-g**). Esto es de gran utilidad porque en su conjunto permiten llevar a cabo el estudio comparativo entre los datos de ésta investigación con los reportes de trabajos previos realizados en otras secuencias de suelos volcánicos en diferentes *estadios pedológicos* (*Ortega et al., 2004; Rivas, 2006 y 2010*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis Magnética

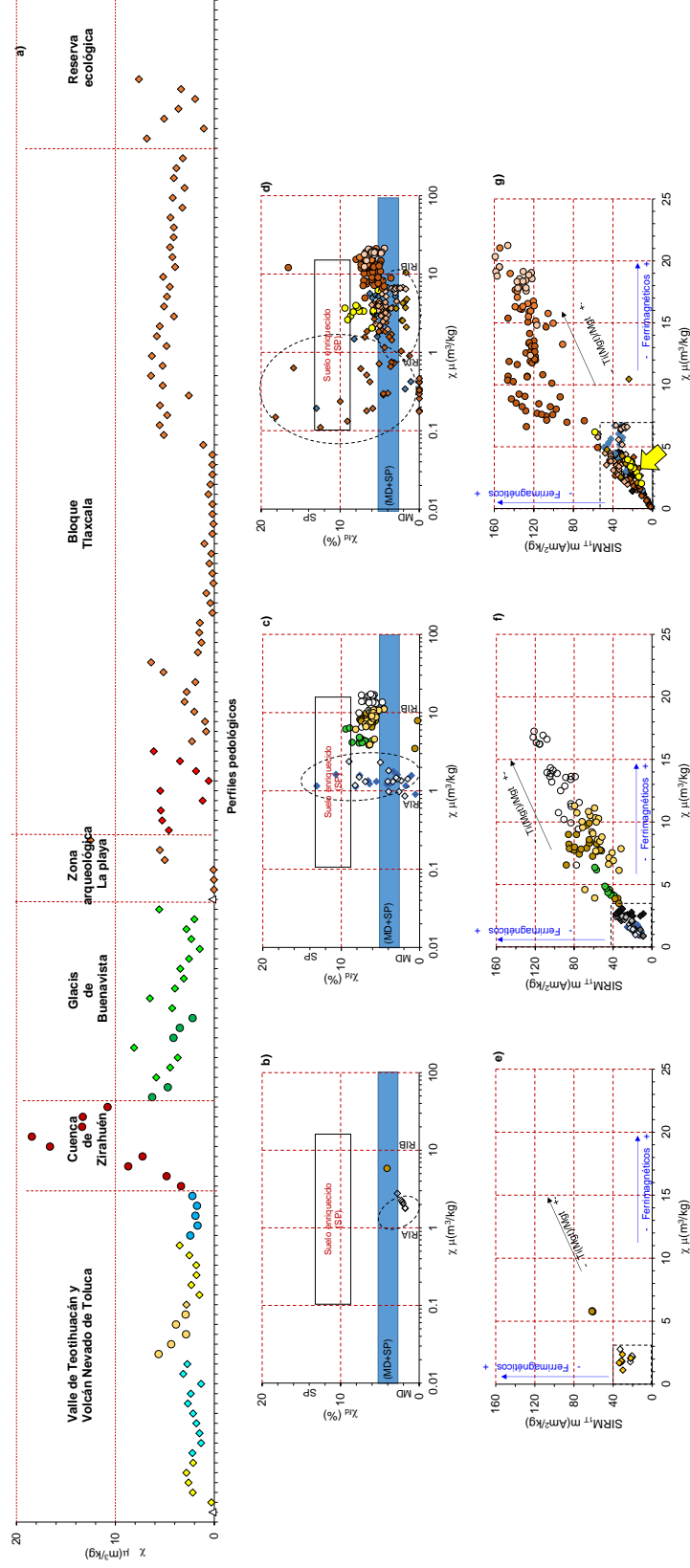


Figura 40.- Comparación entre parámetros magnéticos de perfiles volcánicos modernos y antiguos. La figura está compuesta en la parte superior y al centro (a) por el registro de susceptibilidad magnética promedio de varias secuencias de suelos que se han estado estudiando en México bajo diversas perspectivas. En la parte inferior (b-g), se muestra la relación entre los parámetros magnéticos de concentración (χ , SIRM_{1T}) y de sus dominios ($\chi_{fd(10)}$) para etapas moderadas de evolución pedogenética, como Cambisol (gráficos b, e) y Andosol (gráficos c, f), así como para etapas avanzadas, Luvisol (gráficos d, g) respectivamente. Los datos corresponden a diversos estudios previos (Rivas, 2003; Borezja, 2005; Ortega et al., 2006; Rivas, 2006; Rivas et al., 2006; Rivas, 2010; Sólís, 2010; Cruz, 2011; Barceñas, 2015, etc). En su conjunto, estas relaciones permiten inferir información sobre la fuente y composición de las partículas magnéticas, su posible relación entre fuente y dominio magnético (gráficos b-d), así como la relación concentración-composición (gráficos e-g) respectivamente (Dearring, 1994; Thompson y Oldfield, 1986, entre otros). La simbología (gráfico a) denota de manera general las secuencias de suelos eólicos (triángulos), paleosuelos volcánicos (rombos), así como las secuencias de suelos que se analizan en este documento (círculos). Los colores representan a las secuencias estudiadas en el valle de Teotihuacán (amarillo), Nevado de Toluca (azul), Tiaxcala (rojo), Glacis de Buenavista (verde), otras secuencias (naranja). En los gráficos (b-g) las líneas negras discontinuas permiten delimitar gráficamente los suelos de ésta investigación de los paleosuelos de trabajos previos con un grado evolutivo análogo entre sí. La flecha color amarilla (Figura g) indica un Luvisol moderno en el umbral de los paleo-Luvisoles.

Es decir, en este caso se utiliza el termino *estadio pedológico* como una manera diferenciar una misma evolución pedológica en función del tiempo, para enfatizar si se trata de una secuencia moderna de este trabajo (SVM) ó una antigua (PLOV), e incluso comenzar a establecer el rol de la *pedogénesis magnética* de los suelos volcánicos con otros registros ambientales como en secuencias eólicas (*Rivas et al., 2006*) ó lacustres (*Vázquez, 2012*).

Para este análisis se ha considerado el registro de los valores reportados en trabajos previos (*Rivas 2003 y 2006; Ortega et al., 2006; Rivas et al., 2006, entre otros*) para secuencias de paleosuelos volcánicos (PLOV) con grados evolutivos fundamentales representativos de etapas moderadas y avanzadas, similares a las que aquí se presentan, es decir, en este caso se trata de Cambisoles (PLOVC), Andosoles (PLOVA), y Luvisoles (PLOVL).

De manera general, los resultados muestran el agrupamiento preferencial de los suelos dentro de los diagramas (*Figura 40b-g*). Se puede observar que a pesar de tener la misma etapa evolutiva, aunque con diferente *estadio pedológico* (SVM vs PLOV), conservan las tendencias lineales crecientes en las tres etapas evolutivas. Sobresale la relación directa que existe entre los parámetros magnéticos, resaltando que los suelos de mayor *estadio pedológico* (registro magnéticos previos de paleo Luvisoles, PLOVL) tienen una firma de su *pedogénesis magnética* similar a la de su análogo (SVM~AHLV) analizado en este documento y menor con respecto a secuencias de suelos bajo condiciones templadas subhúmedas en la cuenca de Zirahuén (SVMM), de tal manera que si firma magnética es $SVMM > AHLV \sim PLOV$. Esto como resultado de los diversos materiales parentales que dan origen a los suelos, y que probablemente para el caso de SVMM se encuentren, además en la transición a hacia etapas relativamente análogas con una mayor y más intensa pedogénesis.

A continuación se analiza con mayor detalle cada una de estas etapas evolutivas para poder identificar las características de la firma magnética en cada *estadio pedológico*.

6.6.1 Análisis magnético entre estadios

de Cambisoles volcánicos

De acuerdo con el diagrama de concentración/dominio, los Cambisoles antiguos (PLOVC) tienen una *pedogénesis magnética* de menor intensidad (valores más bajos en ambos parámetros) con respecto a las secuencias de este estudio, SVMC (CGBE y CGN), respectivamente (*Figura 40b*). Los resultados indican que los registros de susceptibilidad magnética (χ) para esta etapa moderada de evolución, son mayores en los *estadios pedológicos* SVMC con respecto a PLOVC ($\sim 3:1$, χ) y ($\sim 2:1$, $\chi_{fd\%}$) aproximadamente. Éstos últimos se desarrollan relativamente más lento (abundantes partículas MD) a partir de rocas ígneas ácidas (RIA) mientras que en SVMC se formarían de rocas ígneas intermedio/básicas (RII/RIB)

respectivamente (*Dearing, 1999*). En ese sentido, varios autores han establecido el rol de la composición del material parental como fuente de hierro a partir de los minerales primarios (*Murad y Fischer, 1985, Lu Sh, 2000; Su et al., 2015*), y por ende de la mineralogía magnética, su alteración y propiedades a diferentes tasas de pedogénesis, lo que se resalta en este comparativo de *estadios* para suelos volcánicos con evolución moderada.

De forma análoga, el diagrama de concentración (**Figura 40e**) presenta un ordenamiento lineal y preferencial de los perfiles que indica un incremento de Ti(Mgt) hacia el extremo superior derecho, en donde los SVMC muestran una mayor remanencia de saturación (~ 3:1) en comparación con PLOVC.

En su conjunto, esto señala que la *pedogénesis magnética* de SVMC se debe a una mayor concentración de ferrimagnéticos ultrafinos. La presencia de abundantes granos SP y el bajo contenido de MD en SVMC, sugiere que en éstos, su transformación ha sido más rápida con respecto PLOVC, y que en general se caracterizan por tener una mayor concentración de ferrimagnéticos gruesos, con mezclas de coercitividades (*Rivas, 2003*). En estos últimos es mayor contenido de dia/paramagnéticos (Ti, Qz, vidrio p.ej.), resaltando que los SVMC (CGBE/CGN) las Ti(Mgt) poseen un mayor contenido de Mgt en comparación con los perfiles PLOVC. Aunque esto puede parecer contradictorio, la discrepancia entre los dominios magnéticos de ambos *estadios pedológicos*, el material parental, y las ligeras diferencias que se registran en variables ambientales como precipitación/temperatura, cubierta vegetal, pH, L/A, así como en concentración/dominio entre los perfiles CGBE y CGN podría ser indicativo de que la *pedogénesis magnética* en PLOVC ocurre bajo condiciones relativamente más secas y con menor precipitación lo que repercute en la una cubierta vegetal diferente.

Por otro lado, el pH ácido de CGBE refleja probablemente una mayor cantidad y movilidad de Fe (II) de la Mgt, que favorece e influye en una rápida e intensa oxidación parcial (*maghemitización*), reflejándose en una mayor cantidad de Mgh inestable. El cambio de vegetación en SVMC, influenciado por las variaciones del microclima, regula la producción y descomposición de M.O., lo que puede ser un factor preponderante en la acidificación natural del suelo y contribuye a la reducción de la mineralogía magnética.

Varios autores, han establecido que el material parental (*Lu Sh, 2000; Su et al., 2015*, entre otros), es la fuente de minerales primarios y por ende del contenido de (Fe^{+2,3}) en el perfil pedológico y su intemperismo (*Murad y Fischer, 1985*), lo que influye en la evolución rápida del suelo volcánico debido a la transformación y neoformación de los minerales (*Shoji et al., 1993; Zamotaev y Targulian, 1994*). De acuerdo con *Dearing (1999)*, el contenido de Ti es menor en las rocas ígneas ácidas comparado con las básicas, lo que influye junto con la variabilidad de otros cationes y iones metálicos (Al, Mg, p.ej.) en el suelo y en las propiedades

magnéticas del suelo (Wall 2000; Dilon y Blei, 2006). Lu Sh y colaboradores (2008), señalan que la concentración de Mgt decrece con el intemperismo del suelo, reportando que en secuencias de suelos chinos, la susceptibilidad magnética decrece mientras que la susceptibilidad dependiente de frecuencias se incrementa, lo que puede llegar a utilizarse como un indicador de la tasa de pedogénesis de un suelo, como otros reportes previos han comenzado a postular (Lu Z. et al., 2013, entre otros). De ahí, que la distribución lineal de los suelos en los diagramas sean consistentes con éstos reportes, es decir: SVMA > concentración de ferrimagnéticos finos > PLOVA (Rivas, 2003; Ortega et al., 2004; p.ej.,).

6.6.2 Análisis entre estadios pedológicos

de Andosoles volcánicos

Al igual que en la comparación entre los *estadios pedológicos* previos, Cambisol (SVMC vs. PLOVC), para el caso del Andosol de este documento, SVMA (BV), los datos análogos (no reportados) de Michoacán (SVMMA) así como los paleo-Andosoles (PLOVA) los diagramas comparativos de dispersión (Figuras 40 c,f) muestran una clara distribución diferida de éstos (Rivas, 2003). En general, como rasgo distintivo, los perfiles de SVMA muestran una mayor *pedogénesis magnética* (valores de parámetros magnéticos más altos). De acuerdo con los resultados obtenidos, la susceptibilidad (χ) es mayor en SVMA/SVMMA (~8:1) con respecto a PLOVA, y en comparación con $\chi_{fd\%}$ es mayor (~ 3:1), mientras que en las remanencias la tasa de incremento se reduce ligeramente (~ 2:1), siendo menor siempre la firma de PLOVA en todos ellos.

El diagrama χ vs $\chi_{fd\%}$ (Figura 40c) muestra una diferenciación del material parental del cual provienen los suelos en cada *estadio pedológico*, siendo para PLOVA rocas ígneas ácidas/intermedias (RIA/RII). Éstos poseen una mezcla de dominios en los que aún prevalecen altos contenidos de granos MD, con respecto a SVMA, con un incremento en la abundancia de SP con respecto a los perfiles de la etapa evolutiva previamente discutida. Los SVMA/SVMMA se desarrollan a partir de rocas ígneas intermedias/básicas (RII/RIB) en donde el contenido de granos MD resulta escaso, no así los SP que son los más abundantes. En el caso de χ vs SIRM_{IT}, resalta el ordenamiento lineal y zonal sobre una diagonal dentro del gráfico, en el que los perfiles de PLOVA muestran los valores más bajos en ambos parámetros (Figuras 40f). Los valores más altos y con una mayor dispersión, tanto de susceptibilidad como de remanencias en comparación con PLOVA corresponden a los perfiles de SVMA/SVMMA. Esto sugiere una mayor cantidad de ferrimagnéticos que provienen de Ti(Mgt) con un escaso contenido de Ti y/o una menor concentración de paramagnéticos (Thompson y Oldfield, 1986).

El desarrollo de los SVMA/SVMMA a partir de un material parental RII~RIB (agrupación compacta en χ vs $\chi_{fid\%}$ así como sus altas remanencias y dispersión) sugieren que además de contener abundantes Ti(Mgt) con escaso Ti, en éstos probablemente existe una alteración rápida e intensa de paramagnéticos (~ ferrromagnésianos). Esto en su conjunto contribuye a una mayor disponibilidad del hierro en el suelo (aparte de las TiMgh) que da origen a grandes cantidades de Mgh y Gth/Hmt. Las condiciones ambientales de los SVMA/SVMMA bajo las cuales se desarrollan los perfiles (16/22°C con precipitaciones de 1160-1213 mm/a y bajo densas cubiertas forestales) y su distribución en los diagramas sugieren que en estos existe una mayor inestabilidad de suelo (transformación de mineralogía magnética), no así del paisaje. Diversos autores señalan que factores como el tipo de cubierta vegetal, relieve y material parental (estrechamente vinculados con los regímenes de precipitación/temperatura) entre otros contribuyen a la movilidad y distribución del hierro en los suelos (*Porta y Lopez, 1994; Lu y Liu, 2001*). Esto favorece el intemperismo químico rápido e intenso de los suelos, a través de la liberación de hierro en los minerales por dos mecanismos principales: 1) una oxidación, (transformación en Fe^{+3}) y/ó 2) por la movilidad del Fe^{+2} dentro del suelo, siempre que el medio carezca de O_2 (*Acevedo et al., 2004*), lo que ocurre de manera conjunta en el caso de los SVMMA.

En el caso de PLOVA, su compacta agrupación de remanencias y la falta relativa de ésta en las susceptibilidades proponen una mayor estabilidad del suelo (alteración), en comparación con los SVM, en respuesta al cambio en la composición en el tipo de material parental y pH (*Lu Sh, 2000; Acevedo et al., 2004*). Esto influye en la fuente de hierro, su mineralogía magnética, propiedades y distribución dentro del suelo, así como la susceptibilidad de ésta para alterarse. La mayor cantidad de granos MD en PLOA con respecto a SVMA refleja transformaciones variables, lentas y menos intensas en comparación con los SVMA respectivamente. De acuerdo con Solleiro y colaboradores (*2015*), la estabilidad de un Andosol ocurre durante los primeros 5000 años cuando el material parental aun contiene minerales que dan origen al alofano. Shoji y colaboradores (*1993*) indican que éste puede cristalizar a haloisita y caolinita siendo este el principal mecanismo que da lugar a la evolución de los suelos volcánicos, dependiente de varios factores como la composición del vidrio volcánico, tamaño de grano, porosidad y forma de las vesículas de la pómez, pH y temperatura del suelo factores que regulan la tasa de evolución del suelo.

6.6.3 Análisis entre estadios pedológicos

de Luvisoles volcánicos

A diferencia del análisis comparativo entre *estadios pedológicos* previos (Cambisol/Andosol), en esta sección los Luvisoles muestran un comportamiento relativamente más homogéneo, (**Figuras 40d, g**). Es decir, existe una clara agrupación preferencial entre los suelos (SVML/~SVMML) y los datos de suelos antiguos (PLOVL) respectivamente reportados en otros estudios (*Ortega et al., 2004; Rivas, 2003; 2010*).

La gráfica que relaciona la concentración y dominio magnético (**Figura 40d**) se caracteriza por su alto grado de compactación, con $\Delta\chi \sim$ dos órdenes de magnitud mayor en SVML/SVMML con respecto a PLOVL en promedio aproximadamente, así como una relativa menor dispersión de los primeros. Con respecto a $\chi_{fd\%}$, también mantiene un grado de dispersión semejante, registrando para los PLOVL valores bajos ($\sim < 4\%$). De acuerdo con *Deearing (1999)*, los resultados denotan en su conjunto, un material parental de tipo \sim RIA/RII para el caso del PLOVL con mezclas de granos MD+SP siendo más abundantes las primeras (MD>SP), mientras los SVML/SVMML se asocian más con un material parental del tipo de RIB, en donde las partículas SP son las que predominan (**Figura 40d**).

En el caso de los perfiles SVML/SVMML, las condiciones ambientales como valores de precipitación ($1000\text{mm/a} < P_p$) y temperatura ($20^\circ\text{C} < T$) medios anuales influye en la formación y concentración de los óxidos de hierro (*Dunlop, 1981; Lu y Liu, 2001*), y contribuyen a la formación de una densa cubierta vegetal que además de proteger al suelo, favorece el desarrollo de M.O. (*Porta y López, 1994*). Ésta tiende a descomponerse rápidamente, lo cual contribuye a que el suelo desarrolle un pH ácido, alterando los procesos edáficos que aumentan la hidrólisis ácida, la lixiviación de cationes básicos (*Porta et al., 1999; Lilienfien et al 2000*). Esto fomenta una mayor movilidad del hierro (II) dentro del suelo (*p.ej. Truog, 1948*), lo que puede influir, de manera más intensa en la velocidad y la tasa de diversos procesos como la ferralitización, laterización, podsolización, gleyficación y solodización (*Acevedo et al., 2004*), lo que se refleja en la coloración del suelo (*Ovalle, 2003*), así como en la composición de la mineralogía del suelo y sus propiedades magnéticas.

Por otro lado, el diagrama χ vs SIRM_{1T} muestra una evidente separación de los perfiles, en donde resalta la tendencia lineal para agruparse de los suelos sobre una diagonal (**Figura 40g**). Los PLOVL muestran una mayor compactación con los valores más bajos en ambos parámetros ($\sim 1:4$), con respecto a los SVML/SVMML, donde la dispersión es mayor. Excepto en SVML (BV) de este documento, que muestra valores similares a los que se registran en PLOVL. De acuerdo con *Thompson y Oldfield (1986)*, la distribución de los perfiles en el diagrama sugiere que en ellos lo que predominan son las Ti(Mgt). La mayor dispersión

(SVML/SVMML) sugiere un variable y menor contenido de Ti, mientras que los PLOVL, probablemente sea un indicador del aumento relativo de paramagnéticos y/o de Ti.

Conjuntamente, los resultados indican que la diferencia del material parental entre los *estadios pedológicos* repercute en el contenido de ferromagnesianos disponibles como fuente de Fe (II/III) que se incorpora al suelo y en su dinámica de formación/desarrollo, lo que le imprime un incremento a la magnitud de la *firma magnética* de los SVML. De acuerdo con Acevedo y colaboradores (2010), suelos desarrollados bajo condiciones análogas (cubierta forestal, pH, ácido, pp>1000mm/a, T~16°C), son asociados con el intemperismo de un material basáltico.

Los resultados sugieren que la pedogénesis de AHLV ~ PLOVL, mientras que en los perfiles SVMML la pedogénesis es más intensa, dada su mayor concentración de ferrimagnéticos finos y ultrafinos, lo cual podría sugerir que éstas secuencias se encuentran en una fase intermedia hacia una relativa mayor evolución pedológica, probablemente de tipo Alfisol/Oxisol. Esto resulta consistente con propuesta de *Lu Sh y colaboradores (2008)*, quienes señalan que en un suelo cuando el material parental comienza a intemperizarse, el material fresco grueso y detrítico de ferrimagnéticos, Ti(Mgt-Mgt) p.ej., se reduce en tamaño por intemperismo físico, mientras que los residuos primarios se enriquecen con materiales intemperizables. Posteriormente, los detritos del suelo a través del intemperismo y pedogénesis se hidrolizan para neo-formar minerales ferri/antiferrimagnéticos, lo que se refleja en un decremento en la cantidad de Mgt con el intemperismo, por lo que los registros de χ disminuyen, mientras que los de $\chi_{fd\%}$ se incrementan.

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

6.7 Comparación magnética entre registros de evolución pedológica de otras secuencias

En los últimos años, las investigaciones pedológicas y ambientales han incrementado el estudio de las características morfológicas, físicas y químicas de los procesos a los que se someten los suelos a través del tiempo, lo que varios autores han denominado como: *la memoria del suelo* (Targulian y Solokova, 1996; Bronger, 1997; Targulian y Goryachkin, 2004; Targulian y Krasilnikov, 2007). Incluso, recientemente con mayor énfasis los estudios del suelo están implementando el uso y análisis de las técnicas del magnetismo ambiental como una herramienta complementaria, aunque éstos se llevan a cabo todavía en secuencias de suelos de origen eólico fundamentalmente, por lo que aún resultan ser comparativamente pocos los trabajos realizados en suelos volcánicos (Lu Sh et al., 2012; Jordanova et al., 2016, entre otros).

Los suelos volcánicos son sometidos a una evolución rápida producto de la transformación por intemperismo de los minerales, así como por la neoformación de otras fases, siendo éstos mecanismos responsables de controlar los procesos pedogenéticos de los materiales volcánicos no consolidados como flujos piroclásticos, depósitos de caída, escoria, lahares, etc., bajo condiciones climáticas uniformes (Shoji, et al., 1993; Zamotaev y Targulian, 1994, etc.). La mayor parte de este tipo de material contiene abundante hierro ($\text{Fe}^{+2,+3}$), el cual se encuentra principalmente en forma hierro óxidos e hidróxidos (óptimos para los análisis magnéticos ~anti/ferrimagnéticos), en minerales primarios como ferromagnesianos, silicatos y derivados neosilicatos y filosilicatos p.ej., biot, Olv, arcillas (1:1~Caol, 2:1~Smec, Verm), así como en algunos minerales de corto rango (amorfos~Ferr, imogolita, alofano), que son producto del intemperismo de material volcánico de tipo pómez y vidrio (p.ej., Murad y Fischer, 1985 en Acevedo et al., 2004). Éstos con el tiempo cristalizan a haloisita, esmectita y caolinita, los cuales tienen menos capacidad para estabilizar los componentes húmicos, por lo que la M.O. decrece (Solleiro et al., 2015).

Diversos autores establecen que la presencia de óxidos de hierro en el suelo contribuye a la estabilidad de sus agregados así como a la estructura del suelo (Peacock y Rimmer 2000, entre otros). Dichos aspectos son dependientes del pH del perfil, considerándose que con un pH ácido, el hierro presente en el suelo precipita sobre la superficie de los minerales arcillosos, mientras que una vez que se desarrollan películas de arcilla y rasgos slickensides con valores de pH elevados los óxidos de hierro son estables (Truog, 1948; Lucas y Davis, 1970).

En esta sección se muestran una breve comparación entre las características de las propiedades magnéticas de los suelos volcánicos analizados en este documento con los reportes de secuencias

con evoluciones pedológicas análogas de otras investigaciones con la finalidad de poder establecer el papel que los suelos volcánicos están alcanzando a desarrollar como fuente de información complementaria en los estudios ambientales en México.

6.7.1 Regosol

Es considerado como una de las etapas tempranas de evolución pedológica, con un perfil poco desarrollado que evoluciona a partir de un material parental no consolidado y alterado (**Porta y López, 1994; WRB, 2006**). Solleiro y colaboradores (**2015**), establecen que es una fase incipiente de evolución, que a pesar de su pobre memoria pedológica, comprende la unidad elemental para ser un registro de información paleoclimática, misma que podría ser borrada o modificada con relativa facilidad por procesos de diagénesis. También lo ubican como la fase incipiente de secuencias pedológicas con arcillas que se forman bajo climas húmedos y semi áridos.

Sánchez y colaboradores (**2016**), realizan un análisis magnético de polvos urbano (partículas contaminantes superficiales, 0-0.05m), en lo que se conoce en la literatura como *suelos urbanos* (**Matzka y Maher, 1999; Lu Sh. et al., 2007 y 2016, p.ej.,**). Éstos podrían ser considerados por su carácter antrópico (~100% artificial), como Tecnosoles, y no realmente como un suelo (**WRB 2006**). Los autores comparan la dispersión magnética del *suelo urbano* entre dos ciudades (Mexicali-Calexico) en la frontera México/USA bajo un clima árido/cálido con muestras de control de algunos Arenosoles, Regosoles y Vertisoles (suelos de evolución incipiente/moderada) que son asociados con partículas limo/fluviales semi-consolidados de una llanura salina deltaica del río Bravo como material parental. De acuerdo con sus resultados, el registro de IRM fluctúan entre 3.22 y 2.67mAm²/kg (pseudo saturación ~0.7T), en donde el Regosol tiene valores intermedios comparado con las otras etapas de control. También reportan que los valores de $\chi_{fd\%}$ oscilan entre 0-12%, siendo los Tecnosoles y las muestras de control (Regosoles), los que registran un sutil aumento en la concentración de granos gruesos (en ambas ciudades), registrándose una disminución parcial de éstos que resalta el relativo incremento de las partículas ultrafinas (muestras de control).

En comparación con el trabajo previo (**Sánchez et al., 2016**), los resultados obtenidos en los Regosoles volcánicos (región 3, VNT) de este documento muestran una diferencia en relación con la distribución de dominio magnético, que está vinculado con las condiciones ambientales (árido/cálido vs frías) que regulan los procesos que actúan sobre el material parental (llanura fluvial vs. volcánico). La similitud que reflejan los parámetros magnéticos para ambos trabajos (presencia de material de tipo RIA, abundantes partículas MD), sugieren que probablemente la distribución del

resto de la granulometría magnética, así como la composición y concentración de la mineralogía magnética, en especial de la fracción dura, contribuyen a la diferenciación de la pedogénesis magnética. En el caso de los Regosoles volcánicos, con predominio de $Ti(Mgt/Mgh)_{-Ti}/(Mgt/Mgh)$ de grano grueso, las sutiles variaciones registradas en sus propiedades indican lentas tasas de pedogénesis relacionadas más con la concentración de granos SD que los SP, los cuales son casi nulos, mientras que la mayor presencia de éstos últimos en el reporte de Sánchez y colaboradores (2016) contribuye a imprimirles su carácter antrópico.

6.7.2 Fluvisol

El Fluvisol es un suelo joven con un perfil poco desarrollado, en una de las etapas tempranas de evolución pedológica, que se forma a partir de un material parental aluvial (fluvial, lacustre ó marino) reciente (*Porta y López, 1994; WRB, 2006; FAO*).

Jordanova y colaboradores (2011) reportan la presencia y ausencia de un aumento magnético superficial (\sim RMS) en tres Planosoles (suelos pseudo análogos a los Fluvisoles, que están relacionados con un material de origen aluvial en su mayoría; *WRB, 2006*) desarrollados bajo una cubierta forestal en sureste de Bulgaria. Los autores establecen una relación directa entre el contenido de arcilla y el registro de χ para cada suelo analizado, enfatizando la importancia que tiene el material parental sobre el desarrollo de los perfiles y sus propiedades magnéticas. También señalan que la diferenciación textural y las variaciones en las propiedades de los Planosoles se debe a cambios en la composición química de los suelos, lo que se refleja en la distribución de la mineralogía magnética. El perfil que carece del aumento magnético posee $Ti(Mgt)$, mientras que aquellos que si lo presentan, poseen una mayor contribución de minerales paramagnéticos así como Hmt (en bajas concentraciones) dentro de su material parental. Los valores altos de susceptibilidad magnética (χ) \sim RMS en los horizontes húmicos lo interpretan con la alternancia de condiciones aeróbicas y anaeróbicas, lo que favorece la formación de óxidos de hierro Mgt/Mgh de grano SP y SD (*Maher, 1988; Jordanova et al., 2011*). El entorno ambiental de los suelos favorece la formación de condiciones reductomórficas y consideran que el suelo puede estar sometido a procesos de ferrólisis (\sim disolución del hierro), como el factor que más influye a la concentración de las partículas para, día y antiferrimagnéticas que registran en los perfiles de susceptibilidad.

Por otro lado, los resultados del análisis magnético de los Fluvisoles volcánicos de este estudio (SNP, OTM) señalan una relativa semejanza con el reporte de Jordanova y colaboradores (2016), al registrar también la presencia y ausencia de un aumento magnético superficial aunque

con variaciones en sus propiedades. A diferencia de lo que ocurre en los Planosoles, los Fluvisoles volcánicos se caracterizan por una baja concentración de minerales magnéticos y de partículas ferrimagnéticas en donde lo que predomina, relativamente son las $Ti(Mgt)_{-Ti}$ con una mezcla de minerales de coercitividades variables con un suave aumento de G_{th} , todas ellas comparativamente con una menor concentración. Los resultados señalan que el Fluvisol (OTM/RMS) se relaciona con una mezcla de dominios magnéticos controlada por una relativa alta cantidad de granos SP y SD, comparado con el perfil que no lo registra (SNP) que presenta la coexistencia de partículas MD y SP, en menor concentración éstas últimas.

6.7.3 Cambisol

El Cambisol es considerado como un suelo en una etapa inicial de formación, con una diferenciación de horizontes que se manifiesta por cambios en sus propiedades (color, textura, $CaCO_3$, etc), desarrollándose sobre materiales de alteración procedentes de una diversidad de rocas, depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial (*Porta y López, 1994; WRB, 2006*). En estudios magnéticos previos realizados en Cambisoles, se reporta que las propiedades magnéticas son dependientes del tipo de material parental y cubierta vegetal (p.ej., *Kapicka et al., 2003*). Inclusive pueden llegar a registrar tanto la presencia como la ausencia de un aumento magnético superficial (*Fialova et al., 2006*), análogo a lo que ocurre en los perfiles analizados en este documento (VT, CGBE/CGN) y que se han reportado de manera parcial previamente (*Rivas, 2010; Rivas et al., 2012*).

En Cambisoles desarrollados a partir de rocas ígneas y metamórficas, bajo una cubierta forestal y pH ácidos se han caracterizado por tener una alta concentración de ferrimagnéticos de grano grueso en la parte superficial, considerando que éste es de carácter antrópico (*Kapicka et al., 2003*). Algunos autores establecen que este tipo de comportamiento se debe a una lenta tasa de disolución similar al de la pedogénesis de un perfil por la neoformación de minerales magnéticos (~bajo condiciones reductoras, p.ej.) en donde la interacción del litter se relaciona con la disminución de la M.O. hacia la parte baja del suelo, sometiendo así a los óxidos de hierro a la formación de complejos órgano/minerales (*Thompson y Oldfield, 1986; Eyre, 1997*).

El estudio desarrollado por Fialova y colaboradores (2006) muestran como un rasgo distintivo de los Cambisoles la ausencia y presencia del realce magnético superficial, RMS, (similar a lo que ocurre en el valle de Teotihuacán). Los autores señalan que la ausencia del realce se debe a la litología del suelo (rocas basálticas, así como granodioritas y gabros,) rica en óxidos de hierro. El

aumento magnético superficial lo vinculan con suelos desarrollados con un material parental diferente y con evidencias de actividad antrópica, lo que influye en sus propiedades magnéticas. De hecho, incluso, reportan también una señal magnética ocasionada por la combinación de ambos aspectos, tanto naturales como antrópicos.

Soubrand y colaboradores (2009), señalan que la ausencia (RMS) en un Cambisol desarrollado sobre un flujo basáltico bajo condiciones templadas, se relaciona con la concentración y distribución de la mineralogía magnética del suelo. Ésta comprende la mezcla de Mgh, Hmt y Gth, y consideran que el desarrollo de una maghematización parcial de Mgt es el proceso que da origen a la Mgh, y determinan que el contenido de Gth en el suelo es bajo, además de considerar que la Mgh también puede ser resultado de la pedogenesis del perfil.

Por otro lado, en el caso de los Cambisoles volcánicos aquí estudiados, sus propiedades de magnetismo ambiental muestran características relativamente análogas en algunos aspectos a los trabajos arriba citados, al carecer (CGBE) y mostrar el aumento magnético (CGN), aunque asociados a diferentes aspectos. Ambos suelos registran un alta cantidad de $Ti(Mgt)_{-Ti}/Mgt$ con una mezcla de coercitividades variable, en donde la fracción magnética dura es controlada por Hmt principalmente. La ausencia (RMS) se asocia con una rápida e intensa transformación de la mineralogía magnética que se interpreta por las altas concentraciones de granos SP y SD presentes en el suelo. Comparativamente, en el caso de CGN, éste posee una relativa disminución de ferrimagnéticos, $Ti(Mgt)$ y Hmt, relacionado con el aumento relativo de granos MD, que sugieren que en éste, dada la posición del suelo y la mezcla de tamaños de grano, está sujeto a la incorporación de material y suelo pre-alterado que se incorpora al suelo, por lo que se puede considerar que el \sim RMS posee un carácter pseudo-secundario en relación al pedogenético estudiado ampliamente en otras secuencias de suelos que asocian con Mgh SP/SD.

6.7.4 Andosol

El Andosol, suelo con una edafogénesis controlada por el tipo de material parental volcánico, se desarrolla fundamentalmente a partir de cenizas volcánicas (rasgo que les imprime su carácter de suelos negros), aunque también pueden formarse a partir de tobas, pumitas, lapillis y otros productos de eyección volcánica (Porta y López, 1994; WRB, 2006; FAO). Solleiro y colaboradores (2015) señalan que es una etapa evolutiva de pedogénesis media en suelos con arcilla, bajo condiciones tanto húmedas como áridas, y que es estable durante los primeros 5ka de su formación; cuando el material parental aun contiene minerales que dan origen al alofano,

cristalizando éste a haloisita y caolinita (*Shoji et al., 1993*). Incluso durante el desarrollo del Andosol éste puede presentar diversos intergrados de pedogénesis que dan lugar a proto/Luvisoles (*Sedov et al., 2003*). Es decir, etapas intermedias entre Andosol y Luvisol.

De acuerdo con los autores, el intergrado de Andosol implica la cristalización progresiva de minerales arcillosos 1:1 con una oscilación de condiciones húmedas/secas que ocurren durante la formación de los suelo. También señalan que durante la fase seca, se lleva a cabo una rápida cristalización (minerales 1:1) lo que acelera la transformación Andosol-Luvisol independientemente de del grado de intemperismo de los minerales primarios. De acuerdo con éstos trabajos, la composición del vidrio volcánico, el tamaño de grano, la porosidad y forma de las vesículas de la pómez, pH y temperatura del suelo son algunos de los factores que regulan la tasa de evolución del suelo.

El análisis magnético de un Andosol en Francia, desarrollado a partir de un flujo basáltico, se caracteriza por el enriquecimiento de Ti(Mgt) hacia la parte baja del perfil, registrando valores bajos de χ en la parte superficial (*Soubrant et al., 2009*). Esto como resultado de la mezcla de complejos órgano-minerales y de otros minerales secundarios (oxihidróxidos, haloisita, ilita y esmectita). De acuerdo los autores, el suelo se somete a una oxidación parcial (proceso de maghemitización) que combina el incremento de O₂ con la liberación de hierro. Ambos constituyen los dos principales mecanismo de oxidación de Ti(Mgt), siendo responsables de desplazar (ΔT_c 's, k vs T) en la Ti(Mgt), siendo menor ésta conforme se incrementa el contenido de Ti (*Wall, 2000; p.ej.,*). También concluyen que la magnetización de la Mgh en el Andosol proviene de la Mgt (~75%), y de la adición de M.O. (~17% ≤ M.O.), lo que se refleja en el decremento de la fracción magnética del suelo.

Por otro lado, los resultados obtenidos en el Andosol volcánico (BV) analizado en este documento también registra la ausencia del incremento magnético superficial. El perfil se caracteriza por la presencia de Ti(Mgt)_{Ti}/Mgt como el principal mineral magnético del suelo que coexiste con un alto contenido de Hmt, Mgh y bajo de Gth, en una mezcla de dominios magnéticos controlada por partículas SP y SD, lo cual sugiere una pedogénesis rápida e intensa. Las condiciones ambientales PP/T favorecen el desarrollo de una densa cubierta vegetal (Forestal), sobre un perfil de pH neutro, a partir de un MP de tipo RII contribuyen a que el suelo, presente una intensa alteración de la mineralogía magnética del suelo.

Diversos reportes previos consideran que la ubicación del suelo (BV) corresponde a la región del Glacis en donde la distribución de los suelos se asocia con una pedogénesis relacionada

con una mayor humedad, debido a su gradiente (precipitación/temperatura, cubierta vegetal, etc.), que se refleja en la distribución de los suelos (*Guerrero, 2007; Días et al., 2010*). El exceso de agua en un suelo favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo que el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo (*Topp, 1993*). De acuerdo con Solleiro y colaboradores (*2003*) la asociación de suelo Andosol (BV) con Luvisoles antiguos es evidencia de una pedogénesis diferida debido a diversos periodos de depósito que interrumpen el desarrollo del suelo. Los Andosoles modernos (*Sedov et al., 2003*) bajo precipitaciones similares (BV) se favorecen de un ambiente empobrecido de sílice, lo que contribuye a la formación de altas cantidades de alofano/imogolita (minerales de corto rango), producto de sus condiciones más húmedas. También señalan que su coexistencia con humus contribuye a la estabilidad de los agregados granulares. Aunque datos no magnéticos previos como el análisis de su estructura y componentes ligeramente intemperizados (Pg, Px frag roca), Feo/Fed (alto en A y AB) indican la presencia de amorfos u óxidos de hierro poco cristalizados, así como los valores de Sio y Alo sugieren la presencia de componentes amorfos, en su mayoría de tipo alofano, siendo máximo su contenido en la parte superficial (BV), donde la concentración de ferrimagnéticos es más bajo. Esto probablemente como parte de una redistribución del hierro en el suelo producto de la destrucción y alteración de para a ferrimagnéticos por procesos eluviación/iluviación, oxidación/reducción. La presencia de minerales amorfos de hierro (Ferr, p.ej.) y su alteración no se puede descartar por completo como una dirección/mecanismo de distribución de la mineralogía magnética en el suelo, ya que las condiciones ambientales hacen de éstas fases etapas precursoras de otros minerales magnéticos presentes en un suelo como HidroMgh, Mgt, Hmt, etc (*Barron y Torrent; 2002; Liu et al., 2009; Jordanova et al., 2011*).

6.7.5 Vertisol

El Vertisol es considerado como un suelo de edafogénesis controlada por el tipo de material parental, desarrollándose éste a partir de materiales con una elevada proporción de arcillas 2:1 (p.ej., esmectíticas) ó por productos de alteración de las rocas que las generen, siendo la alternancia entre la expansión y la contracción de las arcillas un rasgo distintivo del suelo, que genera profundas grietas en la estación seca y la formación de superficies de presión y agregados estructurales en forma de cuña (*Porta y López, 1994; WRB, 2006*). Reportes recientes realizados en secuencias desarrolladas a partir de depósitos aluviales y de carbonatos ricos de arcillas, muestran similitudes en sus firmas magnéticas (*Fischer et al., 2008; Linqvist y Feinberg, 2011; Jordanova y*

Jordanova, 2016). Éstos conservan como rasgo distintivo la baja concentración de ferrimagnéticos, misma que decrece hacia la parte inferior de los perfiles (resaltando el incremento magnético superficial, RMS), análogo a lo que ocurre con los perfiles de GB, aunque se observan diferencias en sus propiedades que pueden ser asociadas con el grado de pedogénesis, en respuesta al entorno en el que se desarrollan.

Varios autores asocian el RMS en Vertisoles formados bajo condiciones tropicales y subtropicales con la presencia de Mgt/Mgh de dominio SD-PSD, con variaciones en la concentración de oxihidroxidos de hierro hacia la parte baja, lo que modifica el espectro de coercitividad debido a ciclos (redox) periódicos de intensidad y duración variable (**Thompson et al., 2006; Fischer et al., 2008**).

Linquist y Feinberg, (2011) establecen que para Vertisoles desarrollados a partir de depósitos aluviales, el aumento magnético se debe a la conversión de Gth/Ferr a Mgt/Mgh/Hmt de dominio SP y SD por una gradual oxidación posterior a su depósito. Recientemente **Jordanova y Jordanova (2016)**, señalan que el decremento registrado en la intensidad (~RMS) en Vertisoles antiguos ocurre debido a una disolución de los óxidos de hierro en condiciones anaeróbicas, que involucra una reducción de granos finos de Ferr que dan lugar a Mgt, alterándose ésta posteriormente a Mgh y Hmt.

Por otro lado, los resultados magnéticos obtenidos para los Vertisoles volcánicos de esta investigación ~ (≤ 2.5 ka), ubicados en el Glacis de Buenavista (GB), así como los parcialmente reportados en perfiles antiguos de trabajos previos en el valle de Teotihuacán (~<3ka) registran una firma magnética propia con respecto al resto de los suelos volcánicos estudiados en ésta investigación (**Rivas et al., 2012; Sánchez 2015**). Ésta se caracteriza porque muestran un evidente aumento magnético superficial, que está relacionado con una baja concentración de ferrimagnéticos gruesos, siendo la fuente principal $Ti(Mgt)_{+Ti}$, misma que están asociadas a un material parental diferente, ligeramente ácido. La baja concentración de partículas magnéticas suaves (baja coercitividad), sugiere una relativa mayor contribución de partículas para y antiferrimagnéticas con respecto al resto de los suelos de ésta región.

La comparación entre los resultados magnéticos obtenidos en estos trabajos sugiere que sin importar el *estadio* de la secuencia (moderno ó antiguo), material parental (volcánico ó no), y clima, ésta etapa evolutiva se caracterizan magnéticamente por tener un aumento superficial, así como una baja concentración de ferrimagnéticos. La discrepancia en la composición del espectro de coercitividad y tamaños de dominio magnético son el resultado del grado de pedogénesis de cada

suelo y la sensibilidad de éste a cambios mínimos en las condiciones ambientales bajo las que se desarrolla cada perfil. Esto contribuye a que las propiedades y características magnéticas de los Vertisoles los convierta en suelos favorables para registrar variaciones mínimas en el ambiente útiles para la reconstrucción paleoclimática (*p.ej., Nordt y Driese 2010*) ya que registran de manera eficaz en el suelo, cambios en la estabilidad del paisaje, mismos que pueden abarcar desde decenas y centenas hasta incluso decenas de miles de años en áreas tropicales y subtropicales, así como en regiones más áridas (*Nordt et al 2004; Kovda et al., 2006; Achiyuthan et al 2010; Pal et al., 2012*).

6.7.6 Luvisol

El Luvisol, considerado como un suelo de edafogénesis dependiente del clima (bajo climas templados, fríos o cálidos pero con una estación seca y otra húmeda, como el clima mediterráneo con una meteorización intensa), con una alta tasa de acumulación (~arcillas $\geq 50\%$), lavado superficial de éstas para acumularse en una zona más profunda, que se desarrollan sobre una gran variedad de materiales no consolidados como depósitos glaciares, eólicos, aluviales y coluviales (*Porta y López, 1994; WRB, 2006; FAO*). Solleiro y colaboradores (2015), consideran ésta etapa como una de las de mayor estabilidad para los suelos que poseen altos contenidos de arcilla, bajo climas húmedos, aunque de manera generalizada se considera un periodo de 10ka para su formación, también se ha establecido que su formación se puede acelerar (<10ka) cuando las condiciones ambientales lo permiten (*Bikerland, 1999*)

Análisis magnéticos previos desarrollados en secuencias de loess/paleosuelos (Luvisoles) en Austria y Rusia se caracterizaron por mostrar un incremento superficial (RMS) como rasgo magnético distintivo con una baja concentración de partículas ferrimagnéticas, producto de la mineralogía magnética compuesta por abundantes $Ti(Mgt)_{+Ti}$, que están mezcladas con Gth, Mgt y Hmt, en donde la mayor concentración de granos MD en las secuencias Austriacas marcan la diferencia con respecto a las Rusas, donde éstos son constantes, siendo controlados más por granos SP y SD (*Rivas, 2006; Rivas et al., 2006*).

Jordanova y colaboradores (2010) caracterizan la aparente ausencia de un incremento magnético superficial (RMS), dentro de un Luvisol en Bulgaria, como un registro de la intensidad de los procesos de traslocación que dan lugar a la distribución preferencial de la mineralogía magnética del suelo (Mgh/Hmt/Ferr). Consideran que ésta etapa evolutiva representa las últimas fases de inestabilidad ó evolución progresiva de una secuencia de suelos de tipo (Chernozem-Feozem-Luvisol), en respuesta a las variaciones ambientales. Las propiedades magnéticas del suelo

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis magnética

se caracterizan por tener una relación inversa entre el registro de χ y el pH del suelo, con una relación directa entre el cociente arcilla/arena y χ . Los autores concluyen que la presencia de Mgh en el suelo es resultado de la pedogénesis, con una diferenciación textural de la granulometría magnética que responde a factores biológicos como el contenido e interacción de la M.O., la actividad bacteriana, etc.

En un estudio magnético realizado sobre un Alisol (~ etapa análoga de Luvisol pero fuertemente ácido, con un alto contenido de Al, arcilla Verm/Esmec) desarrollado a partir de schist bajo un clima mediterráneo, Jordanova y colaboradores (2011) señalan que el RMS del suelo se debe a la distribución selectiva de una mezcla de minerales magnéticos en el suelo (Ferr, hidroMagh, Mgh fina, Hmt ultrafina, Gth) debido a un intemperismo elevado, con una mayor concentración de granos SP en la parte superior de la secuencia.

Por otro lado, los resultados del Luvisol volcánico de esta investigación muestran como rasgo distintivo la falta de RMS, como se ha reportado previamente (Rivas, 2003; Ortega et al., 2004), aunque con características específicas en sus propiedades. Magnéticamente, el perfil (AHLV) se caracteriza por tener una moderada y homogénea concentración de partículas ferrimagnéticas, una mineralogía compuesta por $Ti(Mgt/Mgh)_{Ti}$ principalmente de tamaños SD y SP, que coexiste con un espectro de coercitividades variable, vinculado con abundantes Gth/Hmt, así como la presencia de Mgh. Esto puede ser un indicador de una fuerte tasa de alteración a la que se está sometiendo el suelo.

De acuerdo con reportes previos, la ubicación del suelo lo asocia con una mayor humedad, lo que contribuye a la alteración de los minerales magnéticos, considerando que su formación involucra una pedogénesis acelerada, que le imprime al suelo un carácter policíclico y poligenético con al menos 3 etapas de formación, abarcando un periodo ~ 5Ka para el perfil AHLV (Solleiro et al 2003; Gama et al., 2007; Solleiro et al., 2015). Esto es consistente con los datos de carácter no magnético registrados previamente (propiedades químicas, micromorfológicas, etc) que señalan la presencia de fragmentos de roca, suelos, cutanes de iluviación, arcillas alteradas, destrucción de minerales primarios, la pérdida de bases y la acumulación de óxidos de hierro secundario (~amorfo) producto de la alteración de los minerales primarios (Escamilla et al., 2002; Solleiro et., 2004; Díaz, 2008)

6.7.7 Calcisol

El Calcisol, considerado como un suelo de edafogénesis dependiente del clima y de procesos de acumulación ($\sim\text{CaCO}_3 \geq 15\%$) en un perfil, y puede estar presente este (CaCO_3) de distintas maneras, como en nódulos, costras etc. (*Porta y López, 1994; WRB, 2006*).

Wang H y colaboradores (2008) p.ej., reportan un claro aumento magnético (RMS) en el estudio comparativo que realizan entre sedimentos y suelos desarrollados sobre material rico en CaCO_3 en el suroeste de China. Éste se caracteriza por un incremento de granos SD que asocian con cambios en la tasa de erosión para un periodo de 42 años. De acuerdo con los autores, la precipitación, uso del suelo, la actividad humana, así como la cubierta del suelo son factores que controlan la erosión de éste (*Boardman y Favis, 1999; Erskine et al., 2002*).

En un estudio magnético reciente realizado en una secuencia en China formada a partir de rocas calcáreas (bajo condiciones tropicales/subtropicales $\sim 14^\circ\text{C}$, 1030 mm/a) Lu Sh y colaboradores (2012) señalan que la señal magnética (RMS) del suelo consiste del aumento *in situ* de ferrimagnéticos por pedogénesis (con granos de Mgt/Mgh de dominios SP y SSD en la superficie). El decremento de ferrimagnéticos hacia la parte baja de la secuencia lo relacionan con un relativo alto contenido de Mgh que está mezclada con Hmt/Gth. Los autores concluyen que el perfil se intemperiza rápido, con una acumulación residual de los oxihidróxidos de hierro y minerales arcillosos que provienen del material parental (*Lu Sh et al., 2012; Bronger y Bruhn, 1997*). Consideran también que tanto el lavado como la acumulación selectiva y preferencial (CaCO_3) son los procesos pedológicos predominantes que actúan sobre la mineralogía magnética de los suelos desarrollados a partir de material calcáreo (*Lu Sh et al., 2012*). Además, sugieren que ésta característica se puede utilizar como un índice del grado de pedogénesis, con el cual se lleguen a establecer tasas de intemperismo.

Por otro lado, en el caso del Calcisol volcánico analizado en este documento, magnéticamente registra una concentración moderada de ferrimagnéticos, similar a la que se registra en el Luvisol (AHLV) de esta investigación, con una mineralogía controlada por $\text{Ti}(\text{Mgt})\text{-Ti}$ mayormente, con una mezcla de dominios magnéticos heterogéneo que contiene una relativa mayor concentración de granos SD y SP, con poco aporte de MD. La mayor variabilidad registrada en los perfiles magnéticos del perfil (MAS) sugieren continuas variaciones en la humedad del suelo. Esto favorece la disolución y lavado de los carbonatos, así como a la movilidad del hierro (II) a diferentes tasas que se traslocan dentro del perfil, lo que se ve reflejado en la mezcla de dominios magnéticos así como en los sutiles cambios en el espectro de coercitividads (Gth/Hmt) que regula

la concentración de la mineralogía dura en el suelo, y que está estrechamente ligado con la oxidación/reducción del suelo.

La caracterización previa del suelo a partir de datos no magnéticos muestra que el suelo se desarrolla sobre sedimentos coluviales de materiales piroclásticos, con una estructura prismática subangular en bloques, registrando en la fracción de arcilla la presencia de caolinita, haloisita, feldespatos, cuarzo, cristobalita y amorfos (*Cabadas, 2004; Solleiro et al 2006*). De acuerdo con Cabadas (*2004*), la parte baja del valle con menor pendiente contribuye a que en el suelo se imprima como rasgo característico la evidencia de procesos iluviación de arcilla, y redox (moteados de Mn/Fe) por un exceso de humedad en el suelo. Además, el perfil se somete a la incorporación de material volcánico transportado y redepositado por erosión hídrica, en donde las discontinuidades que se observan en los horizontes entre los suelos y paleosuelos reportados previamente muestran los diferentes grados de desarrollo de los perfiles.

La presencia de carbonatos en **MAS** se han asociado a un carácter secundario debido a las evidencias macro y micromorfológicas encontradas (*Cabadas, 2004*), concluyendo que los carbonatos se precipitaron en el lugar a partir de una solución del suelo, y que no son heredados del material original del suelo (material volcanogénico). De acuerdo con *Pustovoytov, (2003)*, los carbonatos en los suelos son producto del clima. *Solleiro y colaboradores (2006)* reportan evidencias de la iluviación de arcilla y calcificación en el suelo, y sugieren que esto ocurre durante la etapa temprana de formación del suelo, precedido por una descalcificación. La acumulación de carbonatos la relacionan con una segunda fase de formación del suelo, debido a la acumulación de arcillas sobre canales que se sobreponen micromorfológicamente a la calcita neoformada a través de la matriz del suelo libre de CaCO_3 , lo que se puede interpretar como la suma acumulada de ciclos de pedogénesis (*Cabadas, 2004*), que se estaría reflejando en los perfiles magnéticos del suelo.

6.8 Pedogénesis magnética como herramienta para los registros ambientales en México

En esta sección se muestra una perspectiva del potencial que pueden alcanzar a desarrollar, probablemente en el corto y mediano plazo, los resultados obtenidos en este estudio como un complemento para los estudios climático/(paleo)-ambientales dado el creciente interés que éstos están adquiriendo en el país actualmente (**Figura 41**).

Anteriormente los estudios magnéticos habrían propuesto la existencia de una firma magnética propia en suelos volcánicos antiguos, con un moderado y avanzado grado de evolución (**Figura 40**), caracterizada por la ausencia de un *enhancement*, así como por la alta intensidad registrada en sus *perfiles magnéticos*, en comparación con secuencias eólicas (**Rivas, 2003 y 2006**).

Esto, además de sugerir que dicha firma puede no ser influenciada por el grado de desarrollo ni la evolución del suelo (**Figuras 41 a, c, e-g**); constituye una herramienta útil como criterio para diferenciar entre suelos desarrollados sobre diversos materiales parentales (**Figuras 41 b, d**), lo que afecta en la tasa, tipo e intensidad de la pedogénesis de un perfil (**Figuras 41i-l**), en especial en las etapas avanzadas del suelo (**Ortega et al., 2004; Rivas, 2006; Rivas et al., 2006**).

Los resultados obtenidos del análisis magnético de esta investigación, se podrían implementar para los estudios previos realizados en suelos volcánicos antiguos en México (**Rivas, 2003; Ortega et al., 2004; Solís, 2010; entre otros**); lo que permitirá adquirir una mayor comprensión de éstos, entender mejor su relación con el entorno (al tener un mayor control de las variables ambientales para el análisis de la mineralogía magnética) e inferir con mayor certeza información de utilidad para otros registros ambientales (p.ej., pedológicos y lacustres), que se están desarrollando con mayor frecuencia en años recientes en el país.

Ejemplo de esto, se presenta con más detalle en el documento a través del análisis comparativo entre condiciones ambientales y evolución (secciones 6.1-6.3, p.ej., **Figuras 33-35**), su *pedogénesis magnética* (6.4; **Figuras 36-38**), *estadios magnéticos* (6.6, **Figura 40**), así como con otros registros pedológicos relativamente análogos (sección 6.7).

Los datos adquiridos resaltan, por ejemplo, la sensibilidad de la mineralogía magnética y sus propiedades a las condiciones ambientales, lo que influye de forma diferida en su pedogénesis y parámetros magnéticos analizados (**Tabla 19**). En este sentido, los procesos pedogenéticos que prevalecieron durante el desarrollo del suelo en el pasado de trabajos previos, especialmente para etapas de mayor estabilidad, p.ej., Luvisol (**Figuras 41 i-l**) han registrado un ordenamiento zonal y preferencial en los diagramas de dispersión, análogo a lo que ocurre en los diagramas de

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis Magnética

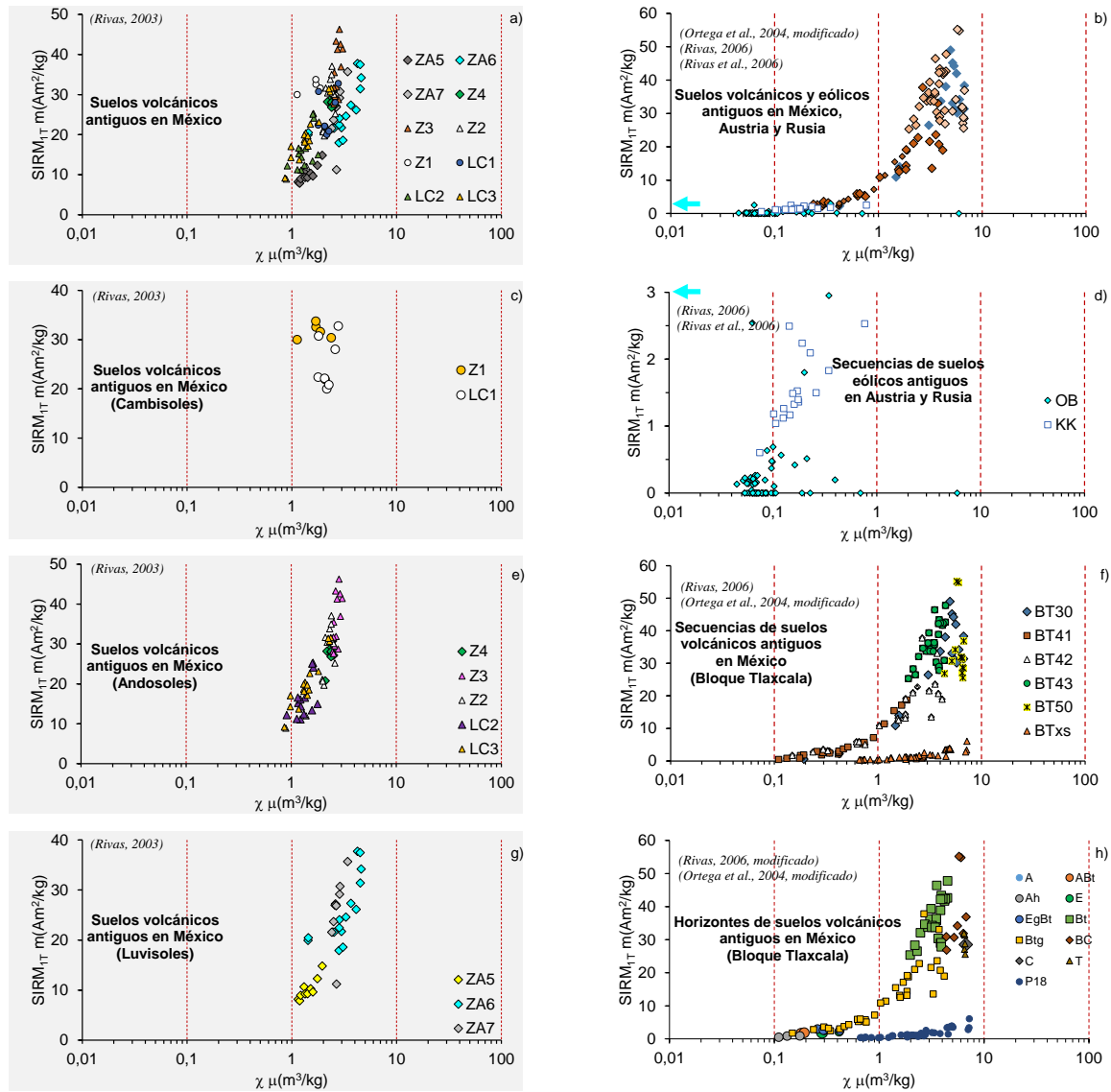


Figura 41.- Pedogénesis magnética como herramienta en registros ambientales en México. La figura ejemplifica la relación entre parámetros de concentración magnética (χ y $SIRM_{1T}$), que son de utilidad para inferir la mineralogía magnética (Thompson y Oldfield, 1986) en suelos de origen eólico (d), sedimentos lacustres (n) y en suelos volcánicos (los demás gráficos). De esta forma, los diagramas (a, b y m) muestran una síntesis de los resultados obtenidos en reportes previos. Los gráficos muestran la relevancia e influencia que reciben los parámetros magnéticos del grado evolutivo del suelo (c, e-g; p.ej.); del material parental (b, d); de los horizontes de un perfil pedológico (f, h); de los procesos pedogenéticos en etapas avanzadas de evolución en suelos volcánicos antiguos (i-l); de las condiciones ambientales sobre diferentes grados de evolución y desarrollo (o, q, s), en estudios ambientales de cuencas (p.ej., Zirahuén) a través de registros lacustres (n) y pedológicos (p, r, t), la relación entre ambos registros (u), y con otros registros pedológicos (v), respectivamente. La simbología (gráfico u y v) si se trata del registro lacustre (triangulo) ó pedológico (círculos y rombos). En éste último, los rombos corresponden a secuencias antiguas. Los datos se toman de reportes previos (Ortega et al., 2004, Rivas, 2003, 2006, 2010; Rivas et al., 2006; Vázquez, 2012, entre otros).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis Magnética

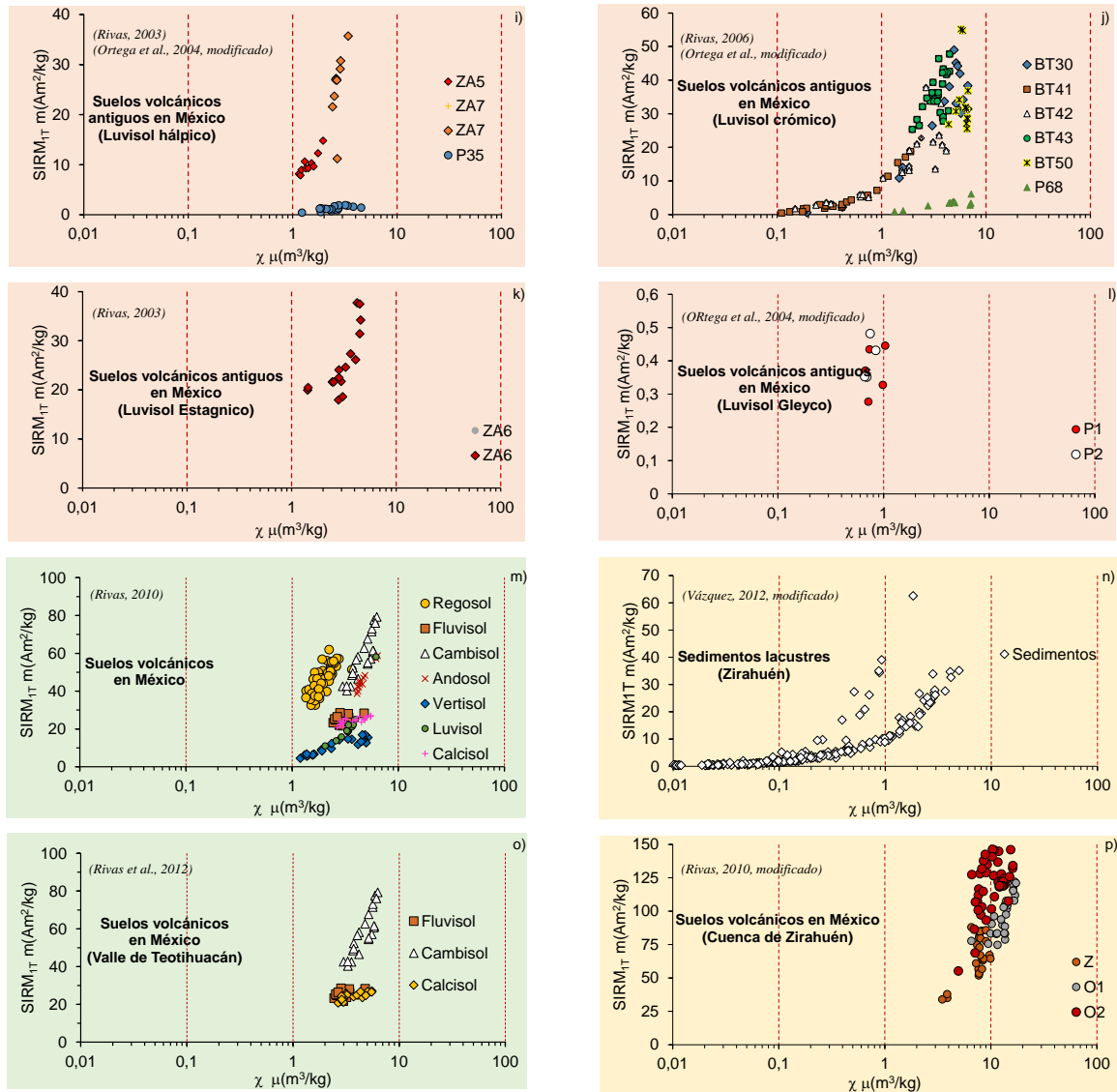


Figura 41.- (Continuación)

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 6:
Pedogénesis Magnética

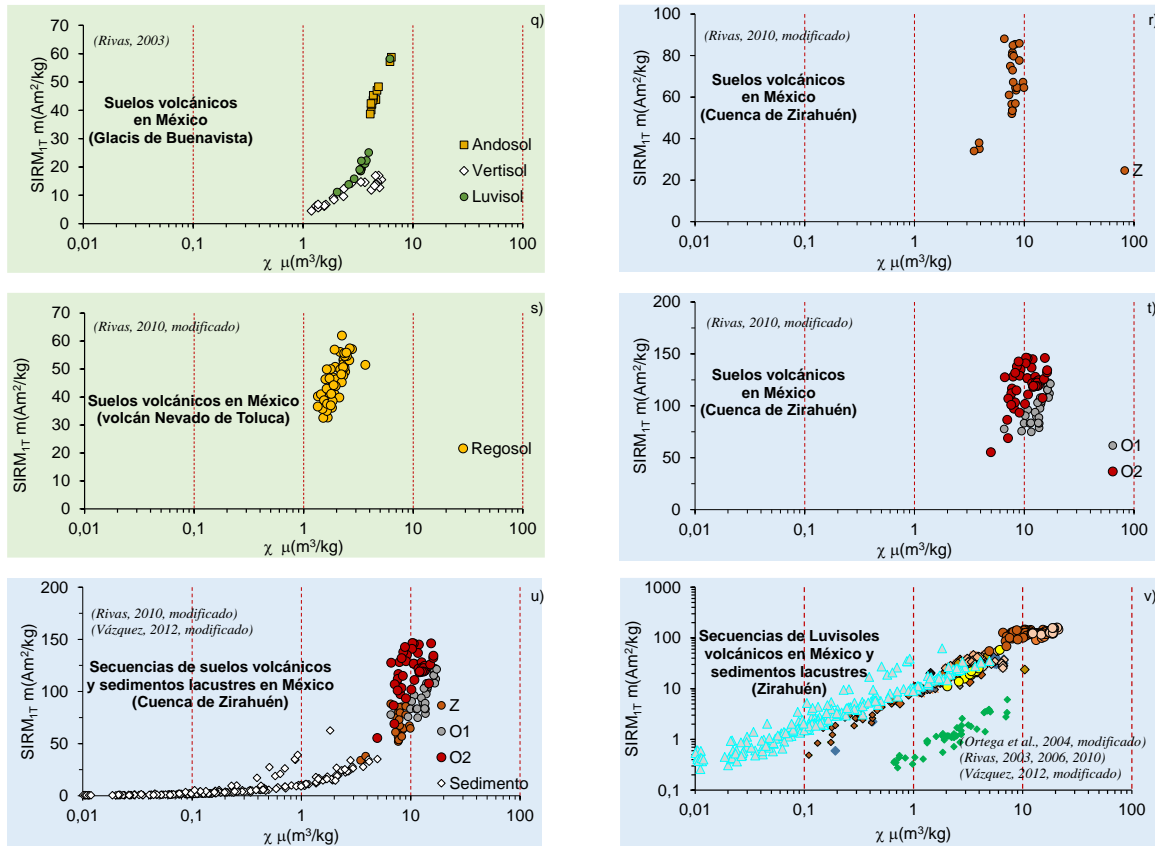


Figura 41.- (Continuación)

de pedogénesis magnética de este estudio (Figuras 36-39).

Otro aspecto que sobresale de este estudio, es la presencia del incremento magnético superficial que habría sido discutido en la sección (6.5), y que se vincula principalmente a etapas incipientes y moderadas en fase temprana de evolución (de acuerdo con el criterio establecido en este documento), resaltando la influencia del relieve y la cubierta vegetal como dos de los factores que contribuyen para que se presente incluso dentro de regímenes similares y bajo un mismo grado evolutivo.

De este modo, se puede comenzar a establecer con estudios más detallados, f:(ambiente/evolución), el vínculo entre factores ambientales registrados en esta investigación con los procesos pedogenéticos reportados anteriormente (Figuras 41 f, h) para determinar las tasas, interacción e influencia con la que actúan durante la formación del suelo en el pasado. Así, por medio de una caracterización bajo un enfoque magnético/pedológico/ambiental (Figura 41 m, o, q,

s), se puede caracterizar otras etapas evolutivas de los suelos volcánicos para entender mejor el papel de la mineralogía magnética en la memoria de los suelos volcánicos.

Con ello, se podrá extrapolar la información adquirida de la *pedogénesis magnética* a otros registros ambientales p.ej., en el estudio de sedimentos lacustres ó de contaminación de suelos, que han comenzado a incorporar y enfatizar los aspectos pedológicos (p.ej., **Vázquez 2012; Pérez, 2016**).

Ejemplo de esto, es el ejercicio que aquí se propone al comparar los datos entre parámetros magnéticos (χ y SIRM_{IT}) y su relación para suelos evolucionados (**Figura 41 g, f, i-l, t**), con una mayor estabilidad (Luvisoles volcánicos) de trabajos previos (**Rivas, 2003, Ortega et al., 2004; Rivas 2006**). Esto para mostrar la posible contribución de la pedogénesis del suelo a la dinámica de una cuenca (**Figuras 41 n, p, r, t**), como un potencial registro de condiciones ambientales en términos de erosión del suelo, variaciones en regímenes de precipitación/temperatura, cubierta vegetal y tasas de sedimentación etc. En este, se observa una estrecha relación entre los parámetros magnéticos de los registros pedológicos con el lacustre (**Figura 41u**), resaltando así la posibilidad de inferir las condiciones ambientales y tasas de los procesos pedogenéticos a los registros ambientales, como se observa en los diagramas de interacción entre parámetros magnéticos (**Figura 41v**). Es decir, en la medida que se lleven a cabo más estudios a detalle con la perspectiva de este documento se podrán estimar a partir de las edades de los suelos y su caracterización magnética, de manera (semi)-cuantitativa, el tiempo que los procesos pedogenéticos actúan sobre la mineralogía magnética de los suelos volcánicos, la influencia de su entorno formativo y con el desarrollo del éstos. De esta manera, se podría establecer, con mayor certidumbre, posibles vínculos con otros registros ambientales como los sedimentos lacustres (**Figura 41v**).

Los datos obtenidos del estudio de la *pedogénesis magnética* les puede aportar información adicional que les indique el origen de los sedimentos, asociado con los suelos volcánicos y sus procesos, en respuesta a las variaciones ambientales a las que se exponen los suelos durante su formación y desarrollo durante los periodos de estabilidad del paisaje.

SALTO DE PÁGINA

(HOJA EN BLANCO, QUE NO SE INCLUYE EN LA NUMERACIÓN DEL TEXTO)

CONCLUSIONES

“Es preciso no perder la pasión por la verdad última y el anhelo por su búsqueda, junto con la audacia de descubrir nuevos rumbos. La Fe mueve a la razón a salir de todo aislamiento y a apostar de buen grado por lo que es bello. Bueno y verdadero. Así, la Fe se hace abogada convencida y conveniente de la razón”

*FE ET RATIO
(Juan Pablo II)*

Capítulo 7

7 Conclusiones

En la presente investigación se llevó a cabo el estudio de la mineralogía magnética en catorce suelos volcánicos modernos que se están desarrollando bajo condiciones ambientales diferentes, agrupados en tres regiones de la FVTM (valle de Teotihuacán, Glacis de Buenavista, volcán Nevado de Toluca) reflejándose esto en etapas incipientes (Regosol, Fluvisol), moderadas (Cambisol, Andosol, Vertisol) y avanzadas (Luvisol, Calcisol) de evolución, con diversos grados de desarrollo pedológico. A partir del análisis detallado de diversos parámetros del magnetismo ambiental se identificó la composición y propiedades de las partículas magnéticas en cada perfil. Las variaciones en las propiedades analizadas, de la mineralogía magnética, a profundidad para cada suelo (*perfiles magnéticos*) han contribuido a establecer firmas magnéticas propias *pedogénesis magnética*. Éstas han permitido establecer su relación con el grado de evolución-pedogénesis de cada suelo y determinar la influencia de las condiciones ambientales en el desarrollo del suelo, su composición magnética y propiedades. Los datos obtenidos en este estudio señalan que al poder caracterizar cada fase de la memoria del suelo volcánico aquí estudiados y su vínculo con el entorno en el que se están desarrollando éstos, la firma de la mineralogía magnética constituye una fuente complementaria de información para los estudios en suelos volcánicos en el país.

En general, los resultados obtenidos de los métodos magnéticos utilizados señalan que la fuente de la mineralogía magnética de los suelos (material parental) proviene principalmente de rocas ígneas intermedias en su mayoría, excepto en los Regosoles y Vertisoles que tienden a desarrollarse a partir de un material relativamente más ácido. La composición de los minerales magnéticos de los suelos es relativamente homogénea dentro de cada perfil, registrándose una estrecha semejanza entre los perfiles a pesar de formarse éstos en regiones con diferentes regímenes de precipitación/temperatura.

Los minerales magnéticos portadores de la magnetización de los suelos son las mezclas de Ti(Mgt) y Ti(Mgh) con un bajo contenido de Ti como las principales fases magnéticas más abundantes. Éstas coexisten con un espectro de coercitividades variable que reflejan la presencia de minerales como Mgt, Mgh, Hmt y Gth, todos ellos con una concentración y distribución diferente en cada perfil, siendo menor (ó enmascaradas) estas dos últimas fases (~ mayor dureza magnética, Hmt ó Gth) por granos de baja coercitividad. Las propiedades magnéticas de estos minerales es variable a profundidad, entre perfiles, así como entre regiones, lo que contribuye a imprimirle a

cada etapa evolutiva una firma magnética propia de su pedogénesis. La mineralogía magnética de los suelos aquí estudiados, y la relativa semejanza en las condiciones ambientales durante su formación en cada región sugieren que sus propiedades son más influenciadas (magnéticamente) por las variaciones en sus coercitividads y la concentración de ferrimagnéticos (indicadores de procesos pedogenéticos, p.ej., intemperismo, redox, etc), así como de los dominios magnéticos (relacionados con tasas de interacción de la pedogénesis). Es decir, prevalecen los granos ferrimagnéticos de dominios finos (SP y SD) para los suelos con mayor desarrollo, mientras que el mayor tamaño de dominio magnético (MD) se asocia con etapas poco evolucionadas.

Los perfiles magnéticos de los suelos aquí estudiados tienden a registrar los valores de concentración más altos (p.ej., χ) para aquellos perfiles que se infiere provienen de un material parental (MP) del tipo roca ígnea ácida (RIA ~ VNT-SVMM), disminuyendo conforme se aproximan más a un material de tipo ígneo intermedio (RII). Se observa que el registro de susceptibilidad magnética (χ) es influenciado por la precipitación y la temperatura del entorno en el que se está formado el perfil. En ese sentido, se observa que ésta es mayor en los Regosoles (VNT) y en los Cambisoles (p.ej., CGBE, VT) con altas tasas de precipitación ($P_p > 850\text{mm}$). A medida que la humedad de una localidad decrece y se incrementa a su vez la temperatura, el registro (χ) disminuye, observándose un relativo aumento de la fracción magnética dura (Hmt, pej.,). Dentro de las regiones con menor humedad, la susceptibilidad es mayor en los climas semi-áridos con respecto a los climas fríos, lo que sugiere que las bajas temperaturas contribuyen a una menor tasa de transformación del suelo, reflejando así más un carácter litológico la mineralogía magnética, mientras que a mayor temperatura, se asocia más con una pedogénesis más intensa relativa y comparativamente.

Por otro lado, del análisis magnético por región de los suelos, se puede observar que de manera general, las partículas magnéticas tienen un agrupamiento ordenado, zonal y preferencial que permite identificar, caracterizar y distinguir magnéticamente a los suelos de acuerdo con su grado de pedogénesis, evolución, y condiciones ambientales (*Figuras 33-35*). Variables como el clima, material parental y cubierta vegetal, así como el drenaje y posición del perfil, son factores que contribuyen a regular tanto los mecanismos de alteración de la mineralogía magnética como sus tasas en cada suelo (*Anexo B*).

De manera particular, los resultados de éste análisis señala que en el valle de Teotihuacán la composición de la mineralogía magnética que predomina en todos los suelos son las $\text{Ti}(\text{Mgt})_{\text{-Ti,Mgt}}$ y $\text{Ti}(\text{Mgh})_{\text{-Ti,Mgh}}$, que están mezcladas, en menor proporción con Hmt y Gth (*Anexo B, Tabla 15*).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 7:
Conclusiones

Las Ti(Mgh)-Mgh tienden a estar presentes con mayor abundancia en los horizontes superficiales, mientras que la variabilidad de coercitividades sugiere que la Hmt está presente en los horizontes superficiales de los suelos con mayor evolución. Análogamente la Gth lo está para los suelos menos evolucionados. Aunque las partículas ferrimagnéticas son las que predominan en los suelos, ésta es menor para aquellos perfiles poco evolucionados, formados bajo una menor humedad.

Por otro lado, para los suelos del Glacis de Buenavista el análisis magnético indica que éstos se caracterizan por el énfasis que tiene el material parental (con respecto a los suelos del valle, p.ej.,) en sus propiedades magnéticas, resaltando el cambio en la mineralogía magnética y sus propiedades de forma más evidente. Aunque también presentan Ti(Mgt)-Mgt y Ti(Mgh)-Mgh como los principales componentes portadores de la magnetización en los suelos (similar a lo que ocurre en VT), sobresale la variabilidad que éstos presentan en sus parámetros magnéticos (GB) debido a su contenido de Ti (**Anexo B, Tabla 16**). Esto refleja en el aporte que presentan los minerales de mayor coercitividad y las impurezas que pueden contener los suelos a la concentración de los minerales magnéticos y sus propiedades. La menor concentración de partículas ferrimagnéticas se encuentra en los Vertisoles, lo que corresponde con los suelos que presentan el mayor contenido de Ti, así como la mayor abundancia relativa de partículas de dominio MD, con respecto al Andosol y el Luvisol. Esto probablemente como resultado del cambio en el tipo de M.P. (~ ácido) y las variaciones del microclima que regulan las tasas expansión/contracción de los Vertisoles. En el resto de los suelos se presenta una mayor abundancia de partículas finas y ultrafinas con una mayor concentración de ferrimagnéticos, asociados con un M.P. más alcalino, debido probablemente a una pedogénesis más rápida e intensa.

En el Nevado de Toluca, la mineralogía magnética de los suelos es controlada por las Ti(Mgt)-Ti, Mgt y Ti(Mgh)-Mgh, predominantemente de dominio MD, con un espectro de coercitividades variable, en el que las Gth predominan en el espectro de minerales de coercitividad alta a lo largo de los suelos (**Anexo B, Tabla 17**). La similitud en la mineralogía magnética de los perfiles y su carácter homogéneo dentro de éstos resalta la diferenciación en las tasas de alteración y transformación de la mineralogía magnética. Las bajas temperaturas influyen más en las propiedades magnéticas de los Regosoles que la alta tasa precipitación ($P_p > 1000 \text{ mm/a}$), lo que se refleja en el predominio de granos con tamaño de dominio principalmente de tipo MD, con sutiles variaciones en la concentración de granos SD.

Por otro lado, el análisis evolutivo de la pedogénesis magnética refleja una diferenciación selectiva de los suelos en función de sus parámetros magnéticos (**Anexo B, Tabla 19**). En el caso

de los suelos con una evolución incipiente (Regosol, Fluvisol), éstos podrían contener una mayor abundancia de partículas frescas próximo al material parental dado su escaso desarrollo. La temperatura puede influir aún más en la destrucción y neoformación de fases magnéticas a pesar de existir una humedad alta en el suelo. Es decir, p.ej., en los Regosoles existe una mayor abundancia relativa de Ti(Mgt), con respecto al Fluvisol, y sin embargo ambas evoluciones muestran concentraciones de ferrimagnéticos secundarios más bajas con respecto al resto de los suelos con mayor evolución que se estudian en la presente investigación.

Por el contrario, los perfiles con una evolución moderada (Cambisol, Andosol, Vertisol) muestran una relativa menor cantidad de minerales magnéticos, y/o Ti con abundantes ferrimagnéticos con una mayor mezcla de coercitividades, producto de una más intensa pedogénesis (alteración, destrucción y neoformación de las partículas magnéticas y su composición) que incrementa la heterogeneidad de las mezclas de minerales magnéticos que constituyen a cada suelo, en especial los horizontes superficiales, que en su mayoría registran un abundante contenido de partículas SP.

En el caso de los suelos con mayor evolución (Luvisol y Calcisol), la abundancia de minerales magnéticos es relativamente similar entre sí, y con respecto a la que presentan los perfiles con un desarrollo pedológico moderado. Es decir, predominan las altas concentraciones relativas de ferrimagnéticos en ambos suelos, aunque éstas son mayores sutilmente y con una mayor abundancia relativa de partículas gruesas en el Luvisol. Un aspecto que resalta con respecto a éste último, son sus bajas concentraciones de ferrimagnéticos en comparación con otros reportes previos, que suelen tener una mayor abundancia (**Figura 40** p.ej.) y su similitud con respecto a los suelos con evolución moderada (Vertisoles y Andosoles) podría estar relacionado con el tipo de cubierta vegetal y los procesos pedogenéticos inherentes a ésta, que aunque existe una mezcla de coercitividades, ésta es controlada en su mayoría por minerales magnéticos suaves. Esto puede estar reflejando aspecto de la estabilidad del paisaje en el Luvisol, al registrar evidencias de las condiciones más intensas a las que se sometió el suelo en etapas tempranas de su desarrollo que podrían ser equiparables con el tipo e intensidad de la pedogénesis de los suelos de evolución moderada.

Otro aspecto que sobresale de la firma de la pedogénesis magnética de los suelos volcánicos analizados en esta investigación es la presencia (aunque solo en 5 perfiles) de un aumento magnético superficial (firma magnética distintiva y ampliamente documentada en secuencias eólicas) que no se habría reportado ó estudiado a detalle con el mismo enfoque

(magnético/pedológico/ambiental) en trabajos previos realizados en México, ni en otras secuencias de suelos de origen volcánico.

Los resultados señalan que ésta particularidad de la firma magnética de los suelos volcánicos se presenta bajo cualquier condición ambiental (precipitación, temperatura, vegetación, etc) aquí estudiada, representada por las regiones analizadas (**Tabla 14**). Sin embargo, el aumento magnético se limita en este documento solo a etapas incipientes y moderadas de evolución principalmente, en donde la *memoria del suelo* (especialmente en los eluviales y transicionales) es más inestable y sensible para registrar y preservarla (**Tabla 19**). De hecho, en ese sentido, el análisis magnético permite caracterizar el grado de aumento magnético superficial e identificar su origen.

En el Cambisol y el Fluvisol bajo condiciones semi-áridas (VT) se debe a la posición en el relieve y el tipo de cubierta vegetal, aspectos que influyen para que se incorpore material alóctono al suelo durante su formación. Bajo condiciones de mayor humedad y temperatura (GB), se observa que este incremento, en la parte superficial de los parámetros magnéticos, se encuentra en los Vertisoles, en los que además de la incorporación de material en la parte superior, la destrucción que ocurren durante la expansión y contracción del suelo, controla la transformación de las partículas magnéticas, al estar sometido el suelo a continuas variaciones estacionales en su humedad, similar a lo que se observa en otros Vertisoles antiguos en Teotihuacán (**Rivas et al., 2012; Serafín Sánchez y Rosa Tovar**, comunicación personal). En el caso del Regosol (bajo condiciones frías, VNT), se debe en su mayoría a la incorporación de material de las laderas del cráter.

A partir del análisis comparativo entre *estadios* (suelos volcánicos modernos y antiguos), se puede observar que a medida que se incrementa la evolución pedogenética de un perfil, también aumenta su registro de susceptibilidad magnética, tanto para los suelos de esta investigación como en trabajos previos. Los resultados de esta investigación conservan las características de las propiedades de la mineralogía magnética establecidas previamente en estudios realizados en secuencias de suelos volcánicos antiguos con grados evolutivos similares (**Rivas, 2003; Ortega et al., 2004**), con excepción de la particularidad citada arriba. Es decir, En su mayoría carecen del incremento magnético superficial, por lo que a pesar de esto, la firma magnética sigue siendo más intensa que la de otros registros pedológicos (**Rivas 2006; Rivas et al., 2006**), con cambios abruptos que se asocian con la transición entre horizontes fundamentales.

Los datos magnéticos obtenidos pueden contribuir a inferir y extrapolar los mecanismos y factores responsables del aumento magnético superficial de los suelos de este documento a secuencias de suelos más antiguos que lo puedan llegar a registrar. En ese sentido, en la comparación entre *estadios pedológicos* se observa que la caracterización de la mineralogía magnética de los suelos es más sensible a los cambios que registran los suelos volcánicos durante su desarrollo, lo que aventaja a varias de las técnicas utilizadas frecuentemente en los estudios del suelo, debido entre otros aspectos a la cantidad de material necesario para los estudios, poca infraestructura de muestreo, su carácter NO-destructivo, y la rapidez para obtener resultados, que bajo condiciones óptimas no excede de 24hrs para tener una completa y total caracterización magnética por muestra.

De esta manera, el análisis de la mineralogía magnética realizado en esta investigación demuestra que es posible adquirir una firma magnética de la memoria de los suelos volcánicos en diferentes fases evolutivas, *pedogénesis magnética*, a partir de la caracterización de sus propiedades a detalle. Así, el análisis de los parámetros magnéticos ha permitido caracterizar a los suelos no solo por regiones, sino también por perfiles que se están formando bajo condiciones ambientales similares dentro de una misma zona. Incluso entre suelos que se encuentran desarrollando una misma etapa de evolución pedológica (fundamental). Esto constituye una herramienta alterna para los trabajos climático/ambientales que se están desarrollando en México, al aportar indirectamente datos sobre las condiciones ambientales asociadas con su pedogénesis y evolución. También puede proporcionar información valiosa y potencialmente complementaria, que sea relativamente fácil de correlacionar, para otras aplicaciones que están comenzando a involucrar al suelo con otros registros como sedimentos lacustres para inferir tasas y fuente de sedimentación ó erosión y pedogénesis en estudios paleoambientales (*Vázquez et al., 2012; Rivas et al., 2012b*), estudios arqueológicos y arqueomagnéticos para establecer una reconstrucción del ambiente y actividad antropogénica en el pasado (*Cruz, 2011; Soler et al., 2015*) ó de contaminación para determinar fuentes de contaminantes y su relación con la actividad humana (*Sánchez et al., 2016*), entre otros que han estado aumentando en años recientes en el país.

BIBLIOGRAFÍA

“La cortesía es una escuela de sensibilidad y desinterés, que exige a la persona cultivar su mente y sus sentidos, aprender a sentir, hablar, y en ciertos momentos, a callar”

AMORIS LAETITIA
(Santo Padre Francisco)

Capítulo 8

8 Bibliografía

A

- Acevedo S.O., Ortiz H.E., Cruz S. M., Cruz Ch. E., (2004), El papel de óxidos de hierro en suelos, *Terra Latinoamericana*, 22, 4, 485-497.
- Achyuthan H., Flora O., Braida M., Shankar N., Stenni B., (2010), Radiocarbon ages of pedogenic carbonate nodules from Coimbatore región, Tamil Nadu, *J Geol Soc. India*, 75, 791-798
- Aguilar R.B., Bautista F., Gogitchaichvili A., Morales C.J., Quintana O.P., Carvallo C., Battu, J., (2013), Rock-magnetic properties of topsoils and urban dust from Morelia (800,000 inhabitants), Mexico: Implications for anthropogenic pollution monitoring in Mexico's medium size cities, *Geofísica Internacional*, LII, 121-133.
- Aguilar R. B., Bautista F., Gogichaisvili A., Morton O., (2011b), Magnetic monitoring of top soils Merida (southern Mexico), *Studia Geophysica et Geodetica*, 55, 377-388.
- Aguilar R. B., Gogichaisvili A., Bautista F., Carvallo C., Battu J., (2011a), SIRM magnetic curves as pollution degree indicator in topsoils and urban dusts from Morelia, Mexico, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*,
- Agustine E., Fitriani D., Safiuddin L.O., Tamuntuan G., Bijaksana S., (2013), Magnetic Susceptibility Properties of Pesticide Contaminated Volcanic Soil, *AIP Conference Proceedings* 1554, 230 (2013); doi: 10.1063/1.4820327
- Akram H., Yoshida A.M., (1998), Rock magnetic properties of the Plesitocene loess-paleosol deposits in river area, Attock basin, Pakistan: is magnetic susceptibility a proxy measure of paleoclimate?, *Earth Planetary Space*, 58, 129-139.
- Ananthapadmanabha A.L., Shanjkar R., Sandeep K., (2014), Rock Magnetic Characterization of Tropical Soils From Southern India: Implications to Pedogenesis and Soil Erosion, *Int. Journal Environment Research*, 8, 3, 659-670.
- Anderson R.S., Hallet B., (1996), Simulating Magnetic Susceptibility Profiles in Loess as an Aid in Quantifying Rates of Dust Deposition and Pedogenic Development, *Quaternary Research*, 45, 1, 1-16
- Anderson J., (2008), An environmental magnetic study of a marine sediment core from Disko Bugt, West Greenland: implications for ocean current variability, *Master Thesis, Geologiska Institutionen Centrum för GeoBiosfärvetenskap, Lund University*, 38.
- Arce J.L., Macías, J.L., Vázquez, S.L., (2003), The 10.5 KA Plinian eruption of Nevado de Toluca, México: stratigraphy and hazard implications, *Geological Society of America Bulletin*, 115(2), 230-248
- Arce, J.L., Layer, P.W., Lassiter, J.C., Benowitz, J., Macías, J.L., Ramírez E.J., (2013), 40Ar/39Ar dating, geochemistry, and isotopic analyses of the quaternary Chichinautzin volcanic field, south of Mexico City: implications for timing, eruption rate, and distribution of volcanism; *Bulletin of Volcanology*, 75, 1-25.
- Aswathanarayana U., (1991), *Soil Resources and the Environment*, Science Publishers Inc., 248.

B

- Balsam et al., (2011), Magnetic susceptibility as a proxy for rainfall: worldwide data from tropical and temperate climate, *Quaternary Science Review*, 30, 19-20.
- Balsam W., Ji J., Chen, J., (2004), Climatic interpretation of Luochuan and Lingtai loess sections, China, Based on changing iron oxide mineralogy and magnetic susceptibility, *Earth and Planetary Science Letters*, 223, 335-348.
- Banerjee S.K., (1996), Environmental magnetism on nanophase iron minerals: testing the biomineralization pathway, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 154, 210-221
- Banerjee, S.K., (1994), Contributions of fine-particle magnetism to reading the global paleoclimate record, *Journal of Applied Physics*, 75, 5925-5930.
- Banerjee, S.K., King J., Marvin J., (1981), A rapid method for magnetic granulometry with applications to environmental studies, *Geophysical Research Letters*, 8, 4, 333-336.
- Barceinas C. H., (2015), *Uso de propiedades magnéticas en suelos como indicadores paleo-ambientales y de actividades humanas antiguas*, Tesis de Maestría, Posgrado en ciencias de la Tierra, UNAM, 68p.
- Barron V., Torrent J., (2002), Evidence for a simple Pathway to maghemite in Earth and Mars soils, *Geochim. Cosmochim acta* 66: 2801-2806
- Bartel, A.A., Bidegain, J.C., Sinito, A. M., (2011), Magnetic Parameter Analysis of a Climosequence of Soils in the Southern Pampean Region, Argentina, *Geofísica Internacional*, 50, 1, 9-22.
- Basavaiah N., Blaha U., Das P.K., Deenadalayan K., Sadashiv M.B., Schulz H., (2012), Evaluation of environmental magnetic pollution screening in soils of basaltic origin: results from Nashik Thermal Power Station, Maharashtra, India, *Environ Sci Pollut Res*, 19, 3028-3038, DOI 10.1007/s11356-012-0816-1
- Bautista F., Cejudo R., Aguilar B., Gogichaisvili A., (2014), El potencial del magnetismo en la clasificación de suelos: una revisión, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 2, ##-##
- Bentley M.S., Ball A.J., Potter D.K., Wright I.P., Zarnecki J.C., (2009), In situ multi-frequency measurements of magnetic susceptibility as an indicator of planetary regolith maturity, *Planetary and Space Science*, 57, 1491-1499.
- Bentley M.S., Ball A.J., Wright I.P., Zarnecki J.C., (2011), On the application of magnetic methods for the characterization of space weathering products, *Planetary and Space Science*, 59, 79-91.
- Besoain E., (1985), *Mineralogía de arcilla de suelos*, IICA, Costa Rica, 1205.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Bidegain, J. C., Rico, Y., Bartel A.A., Chaparro, M.A., Jurado, S., (2009),** Magnetic Parameters Reflecting Pedogenesis in Pleistocene Loess Deposits of Argentina, *Quaternary International*, **209**, 1 165-186.
- Bijaksana S., Huliselan E., Safiuddin L. O., Fitriani D., Tamuntuan G., Augustine E., (2013),** Rock Magnetic methods in soils and Environmental Estudies: Fundamentals and Case Studies, *Procedia Earth and Planetary Science*, **6**, 8-13.
- Birkeland P.W., (1984),** Holocene soil chronofunctions southern Alps, New Zeland, *Geoderma*, **34**, 115-134
- Birkeland P.W., (1999),** Soils and geomorphology, 3a Ed., *Oxford University Press*, N.Y., 430.
- Bloemedal J., King J.W., Hall F.R., Doh S.J., (1992),** Rock magnetism of Neogene and Pleistocene Deep Sea Sediments: Relationship to sediment source, diagenesis process, and sediment lithology, *Journal of Geophysical Research*, **97**, 4361-4375.
- Bloemedal J., Liu X., (2005),** Rock magnetism and geochemistry of two plio-Pleistocene Chinese loess-palaeosol sequences-implications for quantitative palaeoprecipitation reconstruction; *Palaeo*, **226**, 1-2, 149-166
- Bloemendal, J., (1983),** Palcoenvironmental implications of the magnetic characteristics of sediments from DSDP Site 514, Southeast Argentine Basin, *Initial. Rep. Deep Sea Drill. Proj.*, **71**
- Bloomfield K., Valastro S., (1977),** Late Quaternary Tephrocronology of Nevado de Toluca, Central Mexico, *Overseas Geology and Mineral Resources*, **46**, 15
- Bodek I., Layman W.J., Reehl W.F., (1988),** Environmental inorganic chemistry: properties, processes and estimation methods, *Pergamon N.Y.*, 1233.
- Bogalo M.F., (1999),** Propiedades magnéticas de suelos de los pie de montes del Plio-Pleistoceno y de las terrazas fluviales Cuaternarias del centro de la península Ibérica, implicaciones paleoambientales, *PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, España*, 378.
- Borejsza A., (2006),** Agricultural slope management and soil erosion in Tlaxcala, Mexico. *Ph.D thesis, University of California, Los Angeles*, 564.
- Borejsza A., Frederick C.D., (2008),** Fluvial response to Holocene climate change in low-order streams of central Mexico, *Journal of Quaternary Science*.
- Boardman J., Favis M.D., (1999),** Frequency-magnitude distributions for soils erosion, runoff and rainfall a comparative analysis, *Zeitschrift fur geomorphologie*, **115**, 51-70
- Bronger A., Bruhn L.N., (1997),** Paleopedology of Terrae rossae-Rhodoxeralfs from Quaternary calcarenites in NW Morocco, *Catena*, **28**, 279-295
- Bronger A., (1997),** Time dependence of the rate and direction of mineral weathering and clay mineral formation with special consideration to kaolinites, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. **24**, núm. **3**, 2007, p. 510-523
- Breemenn N.V., Buurman P., (2002),** Soil Formation, *Kluwer Academic Publishers*, 2Ed., 404.
- Buckman H.O., Brady N.C., (1977),** *Naturaleza y Propiedades de los suelos*, Montaner y Simon, 2da Ed., Barcelona, 590p.
- Buntley G.J., Westin F.C., (1965),** A comparative study of developmental color in Chestnut-Chernozem-Brunizem soil climosequence, *Soil Science Soc. Proc.*, 579-582.
- Buol S.W., hole F.D., McCracken J., (2000),** Genesis y clasificación de suelos, *Trillas*, 3ª Ed., México, 417p.

C

- Cabadas Báez Héctor V., (2007),** Paleosuelos del Centro de México como Indicadores de Cambios ambientales Ocurridos Durante los Últimos 30,000 años, *Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geología, UNAM*, 167p.
- Cabadas Báez Héctor V., (2004),** Paleosuelos como Indicadores de Cambio Ambiental en el Cuaternario Superior: El Caso del Valle de Teotihuacán, *Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geología, UNAM*, 168p.
- Caballero M. M., Ortega G. B., (1998),** Lake levels since about 40,000 years ago at lake Chalko, near Mexico City, *Quaternary Research*, **50**, 69-79.
- CALPAL (Cologne Radiocarbon Calibration & Paleoclimate Research Package), Laboratorio de Radiocarbono del Institut für Ur- und Frühgeschichte, Universität zu Köln (<http://www.calpal-online.de>).**
- Cantagrel, J.M., Robin, C., Vincent, P., 1981,** Les grandes etapes d'evolution d'un volcan andesitique composite: Exemple du Nevado de Toluca: *Bulletin Volcanologique*, **44**, 177- 188
- Cappra, L., Carreras, L., Arce, J.L., Macías, J.L., 2006,** The lower Toluca pumice: a ~21,700 yr B.P. Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, México, en: Siebe, C., Macías, J.L., Aguirre, G. J., (eds.), *Neogene-Quaternary continental margin volcanism: a perspective from México: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper, (aceptado)*
- Carrancho A., Villalaín J.J., (2011),** Different mechanism of magnetization recorded in experimental fires: Archeomagnetic implication, *Earth and Planetary Science Letters*, **312**, 176-187.
- Carter S.B., Banerjee S.K., Gourolan A, Oches E., (2006),** A multi-proxy study of Argentina loess: Marine oxygen isotope stage 4 and 5 environmental record from pedogenic hematite, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **239**, 45–62
- Castilla, M.E., Tejero, J.D., 1983,** Estudio florístico del cerro Gordo (próximo a San Juan Teotihuacán) y regiones aledañas: Cd. de México, *Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura*, 128 p.
- Cervantes C. K.E., 2001,** La pómez blanca intermedia: depósito producido por una erupción Pliniana-subpliniana del Volcán Nevado de Toluca hace 12,100 años: México, D.F., *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Tesis de maestría*, 86 p.
- Chaparro E.M.A., (2005),** Análisis y Estudio de Parámetros Magnéticos de Suelos y Sedimentos de Arroyos y Lagunas Relativamente Contaminados – Métodos de Mediciones Magnéticas, *Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas de la U.N.C.P.B.A.*, 248.
- Chaparro M.A.E., Sintio A.M., (2004),** An Alternative Experimental Method To Discriminate Magnetic Phases Using IRM Acquisition Curves and Magnetic Demagnetisation by Alterning Field, *Revista Brasileira de Geofísica*, **22**, **1**, 17-32
- Chaparro, M. A. E., (2006),** Estudio de Parámetros Magnéticos de Distintos Ambientes Relativamente Contaminados en Argentina y Antártida, *Monografía del Instituto de Geofísica, UNAM*, **7**, 107p.
- Chevrier, V., Mathe, P.E., Rochette, P., Gunnlaugsson, H.P., (2006),** Magnetic study of an Antarctic weathering profile on basalt: implications for recent weathering on Mars, *Earth Planet. Sci. Lett.* **244**, 501–514.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Chiang H.C., Wang M.K., Houg K.H., White N., Dixon J., (1999), Mineralogy of B horizon in alpine forest soils of Taiwan, *soil Science*, **164**, 111-122
- Cogoini M., Elmore R. D., Soreghan G. S., Lewchuk M.T., (2001), Contrasting Rock-Magnetic Characteristics of Two Loessite-Paleosol Profiles, Upper Paleozoic, *Phys. Gem. Earth (A)*, **26**, 11-12, 905-910,
- Collinson D.W., (1983), *Methods in Rock Magnetism and Paleomagnetism, Techniques and Instrumentation*, London, New York, Chapman and Hall, 503p
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua, <http://www.gob.mx/conagua>
- Cornell R.M., Schwertmann U., (2000), *The iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*, Wiley-Vch, GmbH & Co. KGaA, 2Ed., 664.
- Cornell R.M., Schwertmann U., (2003), *The iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*, Wiley-Vch, GmbH & Co. KGaA, 2Ed., 664.
- Costantini, E.A.C., Makeev A., Sauer D., (2009), Recent developments and new frontiers in paleopedology, *Quaternary International* (2009), doi:10.1016/j.quaint.2009.08.005
- Crúz C.T., (2011), *Paleoambientes del Cuaternario Tardío en Sonora a partir del Registro Pedológico*, Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM, 147.

D

- Dalan R.A., Banerjee S.K., (1996), Soil magnetism, an approach for examining archaeological landscapes, *Geophysical research letters*; **23**, 2, 185-188.
- Dalan R.A., Banerjee S.K., (1998), Solving Archeological Problems Using Techniques of Soil Magnetism, *Geoarcheology: An International Journal*, **13**, 1, 3-36.
- Lucas R.E., Davis J.F., (1970) en Donahue R.L., Miller R.W., Shickluna J.C., 1981, *Introducción al suelo y al crecimiento de las plantas*, Printece Hall, Dosat, Madrid
- Dana H., (), *Manual de mineralogía tratado de*
- Day, R., Fuller M., Schmidt V. A., (1977), Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain size and composition dependence, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **13**, 260–267, 1977.
- De Boer, C. B., Dekkers M.J., Van Hoof T.A.M., (2001), Rock magnetic properties of TRM carrying baked and molten rocks straddling burnt coal seams, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **126**, 93-108
- Dearing J.A., (1999), Environmental Magnetic Susceptibility, *Chi Publishing, 2a Edición, England*, 54.
- Dearing J.A., Flower R., (1982), The magnetic susceptibility of sedimenting material trapped in Lough Neagh, Northern Ireland, and its erosional significance, *Limnology Oceanography*, **27**, 969-975.
- Dearing J.A., Hay K., Baban S., Huddleston A.S., Wellington E.M.H., Lovel P.J., (1996b), Magnetic Susceptibility of Topsoils: A Test of Conflicting Theories Using A National Database, *Geophysical Journal International*, **127**, 728-734.
- Dearing, J.A. (1994), Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 system, *Chi Publ., Fairfield, CT*.
- Dearing, J.A., Livingstone, I., Zhou, L.P., (1996), A late Quaternary magnetic record of Tunisian loess and its palaeoclimatic significance, *Geophysical Research Letter* **23**, 189-192.
- De Jong E., Pennock D.J, Nestor P.A., (2000), Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada, *Catena* **40**, Issue 3, 291–305
- Dekkers M., (1988), *Some Rock Magnetic Parameters for natural Goethite, Pirrotite, and Fine Grained Hematite*, PhD Thesis, GEOLOGICA ULTRAIECTINA, Mededelingen van het, Instituut voor Aardwetenschappen der Rijksuniv-rsiteit te Utrecht, 249p
- Dekkers M., (1989), Magnetic properties of natural goethite –I. Grain size dependence measured of some low and high field related rock magnetic parameters measured at room temperature, *Geophysics Journal*, **97**, 323-340
- Deng C., Zhu R., Jackson M.J., Verosub K.L., Singer M.J., (2001), Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese loess plateau: A pedogenesis indicator, *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy* **26**, 11–12, 873-878
- Deng C. L., Zhu R., Verosub K.L., Singer M.S., Vidic N.J., (2004), Mineral magnetic properties of loess/paleosol couplets of the central loess plateau of China over the last 1.2 Myr, *Journal of Geophysical Research*, **109**, B01103, doi:10.1029/2003JB002532
- Díaz O. J., (2008), *Cambios Ambientales y Dinámica Erosiva en el Glacis de Buenavista Morelos, en el Cuaternario Tardío: Registros Paleopedológicos*, Tesis de maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM.
- Díaz O. J., Solleiro R.E., Sedov S., Cabadas H., (2010), Paleosuelos y tepetates del Glacis de Buenavista Morelos (México): Testigos de eventos climáticos de la transición Pleistoceno-Holoceno, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **62**, 3, 469-486.
- Díaz O., J., Solleiro R.E., Sedov S., (2011), Spatial arrangement of soil mantle in Glacis de Buenavista, Mexico as a product and record of landscape evolution, *Geomorphology* **135**, 248–261.
- Dilon M., Blei U., (2006), Rock Magnetic signatures in diagenetically altered sediments from Niger deep-sea fan, *Journal of Geophysical Research*, **111**, B03105. doi:10.1029/2004JB0035450.2006
- Dodonov A.E., Gorshkov A. I., Verkhovtseva N. V., Sivtsov A. V., Zhou L. P., (2002), New Data on the Composition of Magnetic Minerals from Paleosols of Southern Tajikistan, *Lithology and Mineral Resources*, **37**, 2, 186–193. Translated from *Litologiya i Poleznyye Iskopaemye*, **2**, 215–222.
- Dokuchaev V.V., (1883), *Russkii Chernozem. (Traducido del ruso por Kaner, N.). Israel Prog. for Sci. Trans., Jerusalén, 1967. Disponible en U.S. Dept. Commerce, Springfield, Va.*
- Dunlop D., Özdemir Ö., (1997), *Rock Magnetism Fundamentals and Frontiers*, Cambridge University Press, 1a Edición, New York, 573p.
- Dunlop D.J., (1986), Las propiedades de histéresis de la magnetita y su dependencia del tamaño de partícula: Una prueba de pseudo-solo modelos de dominio remanencia, *Journal of Geophysical Research*, **91B**, 9569-9584.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Dunlop, D. J. (2002a), Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc): 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data, *J. Geophys. Res.*, **107**(B3), 2056, doi:10.1029/2001JB000486.
- Dunlop, D. J. (2002b), Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc): 2. Application to data for rocks, sediments, and soils, *J. Geophys. Res.*, **107**(B3), 2057, doi:10.1029/2001JB000487
- Dunlop D., 2006, Inverse thermoremanent magnetization, *JGR*, **111**, B12S02, doi:10.1029/2006JB004572
- Dunlop, D. J. (1981), The rock magnetism of fine particles, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **26**, 1 – 26.

E

- Egli R., (1999), Environmental influences on the magnetic properties of lake sediments, *Phd Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich*, 328.
- Egli R., Lowrie W., (2002), An hysteretic remanent magnetization of fine magnetic particles, *JGR*, **107**, Issue B10, EPM 2-1–EPM 2-21
- Ekstrom E.B., Learman D.R., Madden A.S., Hansel C.M., (2010), Contrasting effects of Al substitution on microbial reduction of Fe(III) (Hydr) oxides, *Geochimica et Cosmochimica Acta* **74**, 7086-7099.
- Ellwood B.B., Balsam W.L., Roberts H.H., (2006), Gulf of Mexico sediment sources and sediment transport trends from magnetic susceptibility measurements of surface samples, *Marine Geology*, **230**, 237-248.
- Emmanuel S., Erel Y., Matthews A., Teutsch N., (2005), A preliminary mixing model for Fe isotopes in soils, *Chemical Geology*, **222**, 23–34.
- Erskine W.D., Mahmoudzack A., Meyers C., (2002), Land use effects on sediment yields and soil loss in small basins of Triassic sandstone near Sydney, NSW, Australia, *Catena*, **49**, 1, 271-287.
- Escamilla S., G., E. Solleiro-Rebolledo, S. Sedov, J. Gama-Castro, (2002), Tepetates del Glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos, *Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, **48**: 76-89.
- Evans E.M., Heller F., (2003), Environmental Magnetism Principles and Applications of Enviromagnetics, *Academic Press*, 102p
- Evans E.M., McElhinny M.W., (1969), An investigation of the origin of the stable remanence in magnetite bearing igneous rocks, *Journal Geomag., Geolect.* **21**, 757-773.
- Eyre, J. K., (1997), Frequency dependence of magnetic susceptibility for populations of single domain grains, *Geophys. J. Int.* **129**, 209-211. FAO

F

- Fassbinder, J.W.E., H. Stanjek and H. Vali, (1990), Occurrence of magnetic bacteria in soil, *Nature*, **343**, 161-163. FAO, <http://www.fao.org/soils-portal/es/>
- Fialova H., Maier G., Petrovsky E., Kapicka A., Boyko T., Scholger R., (2006), Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings, *Journal of Applied Geophysics* **59**, 273–283.
- Feng Z.D., Wang H.B., Olson C.G., (2004), Pedogenic Factors Affecting Magnetic Susceptibility of The Last Interglacial Paleosol S1 in the Chinese Loess Plateau, *Earth Surface Processes and Landforms*, *Earth Surf. Process. Landforms* **29**, 1389–1402, DOI: 10.1002/esp.1110
- Ferrari L., López Martínez M., Aguirre-Díaz G., Carrasco-Núñez G., (1999), Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt, *Geology*, **27**, 303-306.
- Fialova H., Maier G., Petrovsky E., Kapicka A., Boyko T., Scholger R., (2006), Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings, *Journal of Applied Geophysics* **59**, 273–283
- Fine P., Singer M.J., Verosub K.L., (1992), Use of magnetic susceptibility measurements in assessing soil uniformity in Chronosequence studies, *Soil Science society of America journal*; **56** (4); 1195-1199.
- Fine P., Verosub K., Singer M., (1995), Pedogenic and lithogenic contributions to the magnetic susceptibility record of the Chinese loess/palaeosol sequence, *Geophys. J. Int.* **122**, 97–107.
- Fine y Singer, (1989), Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of northern California soils, *soil Scientific society, American Journal*, **53**, 1119-1127
- Fisher H., Luster J., Gehring Qa., (2008), Magnetite weathering in a Vertisol with a seasonal redox-dynamics, *Geoderma*, **143**, 41-48
- Fitzpatrick (1978), Introducción a la ciencia del suelo, 1era. Ed., *Publicaciones Cultural, S.A. México*, 197p
- Flores R.D. R. Alcalá M.A., González V., Gama C.J., (1996), Duripans in subtropical and temperate subhumid climate of the Trans-Mexico Volcanic Belt, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **13** (2): 228-239
- Florido F., Zhu R., Guo B. (1999), Low-field susceptibility and palaeorainfall estimates, New data along N-S transect of the Chinese Loess Plateau, *Phys. Chem. Earth (A)*, **24** (9), 817-821.
- Ford I.N., (1984), Dinámica mineral en un suelo, algunos puntos de referencia para su estudio, *Departamento de suelos, Universidad autónoma de Chapingo, Chapingo, Estado de México*.
- Forster, T., Heller, F., (1997), Magnetic enhancement paths in loess sediments from Tajikistan, China and Hungary, *Geophysical Research Letters* **24**, 17–20.
- Foster Th., Evan M.E., Heller F., (1994), The frequency dependence of low field susceptibility in loess sediments, *Geophysical Journal International*, **118**, 363-642
- France D.E., Oldfield F., (2000), Identifying goethite and hematite from rock magnetic measurements of soils and sediments, *Journal of Geophysical Research*, **105**, B2, 2781-2795,
- De Cserna Z., Fries C., (1981), Hoja 14Q-h (7) con resumen de la geología de la hoja de Taxco, estados de Guerrero, México y Morelos, *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, carta geológica de México, serie I:1000,000, map with text 47p*

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Fries, C., (1960), *Geología del estado de Morelos y de partes adyacentes de México y Guerrero, región central-meridional de México*, Instituto de Geología, UNAM, México. **Boletín 60: 236.**
- Fries, C., (1966), *Hoja Cuernavaca 14 Q-h (8) con resumen de la hoja Cuernavaca, estados de Morelos, México, Guerrero y Puebla*, UNAM. Instituto de Geología, *Carta Geológica de México Serie 1:100,000.*

G

- Gama, C.J.E., Solleiro, R.E., Vallejo, G.E., (2000), *Weathered pumice influence on selected alluvial soil properties in west Nayarit, México*, *Soil and Soil Tillage Research*, Elsevier **55**, 143-165.
- Gama, J., Flores Román, D., Solleiro-Rebolledo, E., Jasso-Castañeda, C. Rocha, T.A., Villalpando, J.L., (2004), *Neosols, relic paleosols and alterites 116 characterization and spatial distribution in the Transmexican volcanic belt, Morelos state: a regional approximation*, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* **21:160-174.**
- Gama, J., Solleiro R.E., Flores R.D., Sedov S., Cabadas H., Díaz O.J., (2007), *Los Tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos*, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. **1: 133-145.**
- Gama C.J., McClung, E., Solleiro R.E., Ibarra E., Sedov S., Jasso C.C., Vallejo G.E., Pi P.T., Cabadas B.H., (2005a), *Incorporation of Ethnopedological Knowledge in the Study of Soils in the Teotihuacan valley, Mexico*, *Eurasian Soil Science*, **38**, 1, 95-98.
- Gama C.J., Solleiro R.E., McClung E., Villalpando J.L., Sedov S., Jasso C.C., Palacios M.S., Hernández D., (2005b), *Contribuciones de la Ciencia del Suelo a la Investigación Arqueológica - El Caso de Teotihuacán*, *Terra Latinoamericana*, **23**, 1, 1-11.
- García E., (1988), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen*, Instituto de Geografía, UNAM, 219
- García E., (1968), *Clima actual de Teotihuacán*, (Ed.) José L. Lorenzo, *Materiales para arqueología de Teotihuacán*, INAH, México, 9-28
- García E., (2004), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen*, *Serie de libros del instituto de Geografía*, UNAM, **6**, 90p
- García P. A., Macías, J.L., Tolson, G., Valdez, G., Mora, J.C., (2002), *Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Transmexican Volcanic Belt*, *Geofísica Internacinal* **41(2)**, 133-150.
- García P.A., Macías J.L., Garduño M.V.H., (2000), *Miocent to recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central Mexico*, *Tectonophysics*, **318**
- Gautam P., Blaha U., Appel E., (2005), *Magnetic susceptibility of dust-loaded leaves as a proxy of traffic-related heavy metal pollution in Kathmandu city, Nepal*, *Atmospheric Environment*, **39**, 2201-2211
- Gehring A., Hofmeister A., (1994), *The transformation of Lepidocrocite during heating: amagnetic and spectroscopic study*, *Clays Clay Mineralogy*, **42-4**, 409-415.
- Geiss C. E., (1999), *The development of rock magnetic proxies for paleoclimate reconstruction*, *Phd. Thesis, Minnesota University*; 274.
- Geiss C. E., Zanner W.C., Banerjee S.K. Joanna M., (2004), *Signature of magnetic enhancement in a loessic soil in Nebraska, United States of America*, *Earth and Planetary Science Letters* **228** (2004) 355- 367
- Geiss C., Egli R., Zanner W., (2008), *Direct estimates of pedogenic magnetite as a tool to reconstruct past climates from buried soils*, *Journal of Geophysical Research*, **113**, B11102, doi:10.1029/2008JB005669
- Geiss C.E. Zanner W.C., (2006), *How abundant is pedogenic magnetite? Abundance and grain size estimates for loessic soils based on rock magnetic analyses*, *Journal of Geophysical Research*, **111**, B12S21, doi: 10.1029/2006JB004564
- Geiss C.E. Zanner W.C., (2007), *Sediment magnetic signature of climate in modern loessic soils from the Great Plains*, *Quaternary International*, doi:10.1016/j.quaint.2006.10.035
- Geiss C.E., (2014), *Does timing or location matter? The influence of site variability and short-term variations in precipitation on magnetic enhancement in loessic soils*, *Geoderma*, **230**, 280-287
- Geiss C.E., Banerjee S.K., (1997), *A multi-parameter rock magnetic record of the last glacial-interglacial paleoclimate from south-central Illinois, USA*, *Earth and Planetary Science letters*, **152**, 203-216.
- Geiss, C.E., Zanner, C.W., Banerjee, S.K., Minott, J., (2005), *Signature of magnetic enhancement in a loessic soil in Nebraska, United States of America*, *Earth Planetary Science Letters* **228(3-4)**, 355-367.
- Gilbert C.M., Mahood G., Carmichel I.S.E., (1985), *Volcanic Stratigraphy of the Guadalajara area in México*, *Geofísica Internacional*, **24/1**, 169-191.
- Goguitchaichvili A., Laponte D., Morales J., Acosta A., (2012), *Archaeointensity of the Earth's Magnetic Field retrieved from Pampean Ceramics (South America)*, *Archaeometry*, DOI: 10.1111/j.1475-4754.2011.00620, **54**, 2, 213-224.
- Goguitchaichvili A., Mora J.C., Sanchez Bettucci L., Maciel R., Aguilar B., Morales J., Henry B., Calvo M., (2012a), *Paleomagnetic results from the Chiapanecan Volcanic Arc, Chiapas, Southern Mexico: geomagnetic and geodynamic significance*, *Int. Geol. Rev.*, doi: 1080/00206814.2012.
- Gómez T. A., Orozco E.T., Ferrari, L., (2005), *Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana*, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario. Tomo LVII, N° 3*, 227-283.
- Górka K. B., Jeleńska M.T., Dytlow S. K., (2016), *Magnetic properties as indicators of Chernozem soil development*, *Catena*, **138**, 91-102
- Grimley, D.A., Vepraskas M.J., (2000), *Utilization of magnetic susceptibility for delineating hydric soils*, *Soil Science Soil of America Journal*, v. **64**, no. 6, p. 2184-2180.
- Grimley, D.A., Arruda, N.K., Bramstedt, M.W., (2004), *Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the middle western USA*, *Catena* **58**, 183-213
- Grisson Hana, Petrovský Eduard, Dlouhá Šárka, Kapička Aleš, (2014), *Magnetic and geochemical characterization of volcanic soils developed on basalts in the Massif Central, France, Castle Meeting New trends on Paleo, Rock and Environmental Magnetism Évora*
- Guerrero, P., (2007), *Caracterización y distribución de Tepetates en el Glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y ambientales*, *Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM*, 68pp.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía**H**

- Han, J., H. Lu, N. Wu, and Z. Guo (1996), Magnetic susceptibility of modern soils in China and climate conditions, *Stud. Geophys. Geod.*, **40**, 262–275
- Hao Q., Oldfield F., Bloemendal J., Torrent J., Guo Z., (2009), The record of changing hematite and goethite accumulation over the past 22 Myr on the Chinese Loess Plateau from magnetic measurements and diffuse reflectance spectroscopy, *Journal of Geophysical Research*, **114**, B12101-B12101, doi:10.1029/2009jb006604.
- Harden J.W., (1982), A Quantitative index of soil development field description: examples from a chronosequence in central California, *Geoderma*, **28**, 1-28.
- Harden J.W., Taylor E.M., (1983), A Quantitative Comparison of Soil Development in Four Climatic Regimes, *Quaternary Research*, **20**, 342-359
- Heck R.J., Mermut A. R., (1999?), Mechanisms and rates of iron dissolution from Brazilian Plinthustalfts by dilute hydrochloric and ascorbic acids, *Soil Science an Interdisciplinary Approach to Soil Research*, **164**, 4, 242
- Heller F., Liu T.S., (1984), Magnetism of Chinese Loess Deposits, *Geophysical Journal Royal Astronomical Society*, **77**, England. 125-141.
- Heller F., Liu X.M., Liu T.S., Xu T.C., (1991), Magnetic susceptibility of loess in China, *Earth Planetary Science Letter*. **103**, 301-310.
- Heller, F., Evans, M. E., (1995), Loess Magnetism, *Review of Geophysics*, **33**, 211-240.
- Herrero, B.E., Pal S., (1978), Paleomagnetic study of Sierra de Chichinautzin, Mexico, *Geofísica Internacional*. **17** (2): 167-180.
- Herries A.I.R., Kovacheva M., Kostadinova M., (2008), Mineral magnetism and archaeomagnetic dating of a mediaeval oven from Zlatna Livada, Bulgaria, *Physics and Chemistry of the Earth*, **33**, 496–510.
- Hiell 1998; HILLEL, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press. San Diego. 771 p.
- Hu P., Liu Q., Heslop D., Roberts A.P., Jin Ch., (2015), Soil moisture balance and magnetic enhancement in loess-paleosol sequences from the Tibetan Plateau and Chinese Loess Plateau, *Earth and Planetary Science Letters*, **409**, 120–132
- Huggett R.H., (2007), *Fundamentals of Geomorphology*, Routledge Fundamentals of Physical Geography, **Routledge Taylor and Francis Group**, London and New York, 2Ed., 465.
- Hunt, C.P., Banerjee, S.K., Han, J.M., Solheid, P.A., Oaches, E.A., Sun, W.W., Liu, T.S., (1995), Rock-Magnetic Proxies of Climate Change in the Loess-Paleosol Sequences of the Western Loess Plateau of China, *Geophysical Journal International*, **123**, 232-244.
- Hurst V.J., (1977), Visual estimation of iron saprolite, *Geological Society of America Bulletin*, **88**, 174-176.
- Hus J.J., Han J., (1992), The contribution of less magnetism in China to the retrieval of past global changes - some problems, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **70**, 154-168
- Hus y Geeraerts, (1999), Paleomagnetic and Rock Magnetism Properties of Loess-Paleosols Sequences in Begium, *Geologica Belgica*, 2/3-4, 89-97.

I

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática
- INEGI (1999)- E14A59-T, Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística, Carta Topográfica 1:50,000, Cuernavaca
- INEGI (1999)- E14A59-G, Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística, Carta Geológica 1:50,000, Cuernavaca
- INEGI (1999)- E14A59-E, Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística, Carta Edafología 1:50,000, Cuernavaca
- INEGI (1999)- E14A47, Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística (INEGI), Carta Topográfica 1:50,000, Volcán Nevado de Toluca
- INEGI (1999)-E14A47, Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística (INEGI), Carta Geológica 1:50,000, Volcán Nevado de Toluca
- INEGI (1999)-E14A47, Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística (INEGI), Carta Edafología 1:50,000, Volcán Nevado de Toluca
- INEGI (1999)-E14B21, Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística, Carta Topográfica 1:50,000, Texcoco
- INEGI (1999)-E14B21, Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística, Carta Geológica 1:50,000, Texcoco
- INEGI (1999)-E14B21, Instituto Nacional de Información Geográfica y Estadística, Carta Edafología 1:50,000, Texcoco

J

- Jaksik O., Kodesová R., Kubis A., Drábek O., Kapicka A., (2015), Soil Aggregate stability within morphologically diverse areas, *Catena*, **127**, 287-299.
- Jasso C., Sedov S., Solleiro E., Gama J., (2002), El Desarrollo de los Paleosuelos como Índice de la Estabilidad del Paisaje. Un Ejemplo del Centro de México, *Boletín Investigaciones geográficas*, Número 47, Instituto de Geografía, México, UNAM, pp 20-35.
- Jasso C.C., (2007), *La memoria de los paleosuelos del Nevado de Toluca: Un registro de estabilidad geomórfica y cambio ambiental durante el Cuaternario Tardío*, Tesis doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM,
- Jasso C.C., Sedov S., Gama C. J.E., Solleiro R. E., (2006), Paleosuelos: índices de paleoambiente y de la estabilidad del paisaje del Nevado de Toluca, *Terra Latinoamericana*, **24**, 2, 151-161
- Jelenska M., Hasso A. A., Kopcewicz B., (2010), Thermally induced transformation of magnetic minerals in soil based on rock magnetic study and Mössbauer analysis, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **179** (2010) 164–177
- Jenny H., (1941), *Factors of soils formation*, McGraw Hill, N.Y.,
- Ji, J. F., W. Balsam, and J. Chen (2001), Mineralogic and climatic interpretations of the Luochuan loess section (China) based on diffuse reflectance spectrophotometry, *Quat. Res.*, **56**, 23–30.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Jiang Z., Liu Q., Colombo C., Barron V., Torrent J., Hu P., (2014), Quantification of Al-goethite from diffuse reflectance spectroscopy and magnetic methods, *Geophys. J. Int.*, **196**, 131–144
- Jordanova D., Grygar T., Jordanova N., Petrov P., (2011a), Palaeoclimatic Significance of Hematite/Goethite Ratio in Bulgarian Loess-Palaeosol Sediments Deduced by DRS and Rock Magnetic Measurements, *The Earth's Magnetic Interior, IAGA Special Sopron Book Series*, DOI 10.1007/978-94-007-0323-0_26
- Jordanova D., Jordanova N., Lanos P., Pretrov P., Tsacheva T., (2012), Magnetism of outdoor and indoor settled dust and its utilization as a tool for revealing the effect of elevated particulate air pollution on cardiovascular mortality, *Geochemistry Geophysics Geosystems* **13**, doi 10.1029/2012GC00410
- Jordanova D., Jordanova N., Petrov P., (2014), Pattern of cumulative soil erosion and redistribution pinpointed through magnetic signature of Chernozem soils, *Catena*, **120**, 46-56.
- Jordanova D., Jordanova N., Werban U., (2006), Environmental significance of magnetic properties of Gley soils near Rosslau (Germany), *Environ Earth Sci* DOI 10.1007/s12665-012-2006-3
- Jordanova D., Petersen N., (1999), Paleoclimatic record from a loess-soil profile in northeastern Bulgaria –II. Correlation with global climatic events during the Pleistocene, *Geophysical Journal International*, **138**, 533-540.
- Jordanova D., Petrovsky E., Jordanova N., Evlogiev J. Butchvarova V., (1997), Rock Magnetic Properties of Recent Soils from Northeastern Bulgaria, *Geophysical Journal International*, No.128, pp 474-488.
- Jordanova D., Rao G. S., Kotsev T., Jordanova N., (2013), Industrial contamination of alluvial soils near Fe–Pb mining site revealed by magnetic and geochemical studies, *Geoderma*, **192**, 237–248
- Jordanova N., Jordanova D. Petrov P., Tsacheva Ts., (2010), Soil development of three Chernozem-like profiles from North Bulgaria revealed by magnetic studies, *Catena*, **83**, 158–169
- Jordanova N., Jordanova D., Petrov P., (2011b), Magnetic imprints of pedogenesis in Planosols and Stagnic Alisol from Bulgaria, *Geoderma*, **160**, 477–489
- Jordanova, D., Jordanova, N., Atanasova, A., Ts. Tsacheva, Petrov, P., (2011), Soil tillage erosion estimated by using magnetism of soils – a case study from Bulgaria. *Environmental Monitoring and Assessment* **183**, 381–394.
- Jordanova N., Jordanova D., (2016), Rock-magnetic and geochemical characteristic of relict Vertisols- signs of past climate and recent pedogenic development, *Geophysical Journal International*, **205**, 1437-1454.
- Jordanova N., Jordanova D. Petrov P., (2016), Soil magnetic properties in Bulgaria at a national scale-challenges and benefits, *Global and planetary change*, **137**, 107-122
- Jordanova N., Jordanova D., Tsacheva T., (2008), Application of magnetometry for delineation of anthropogenic pollution in areas covered by various soil types, *Geoderma*, **144**, 3–4, 557–571

K

- Kantor W. Schwertmann U., (1974), Mineralogy and genesis of clays in red-black soil toposequences on basic igneous rocks in Kenya, *J Soil Sci.*, **25**, 67-78
- Kampf, N., and U. Schwertmann (1983), Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils, *Geoderma*, **29**, 27–39.
- Kapicka A., Jordanova N., Petrovsky E., Podrlizsky V., (2003), Magnetic Study of Weakly Contaminated Forest Soils, *Water, Air, and Soil Pollution* **148**, 31-44, 2003.
- Kapicka A., Jordanova N., Petrovsky E., Ustjak S., (2000), Magnetic Stability of Power-Plant Fly Ash in Different Soil Solutions, *Phys. Chem. Earth (A)*, **25**, 5, 431--436.
- Kapicka A., Jordanova N., Petrovsky E., Ustjak S., (2001a), Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes, *Journal of Applied Geophysics*, **48**; 93-102.
- Kapicka A., Petrovsky E., Jordanova N., Podrlizsky V., (2001b), Magnetic Parameters of Forest Top Soils in Krkonose Mountains, *Czech Republic, Phys. Chem. Earth (A)*, **26**, 1, 1-12, 917-922,
- Kapicka, A., Dlouha, S., Grison, H., Jaksik, O., Kodesova, R., Petrovsky, E., (2013,) Magnetism of soils applied for estimation of erosion at an agricultural land., *Geophys Res Abstr*, **15**, EGU2013 -4774
- Kasama T., McEnroe S.A., Ozaki N., Kogure T., Putnis A., (2004), Effects of nanoscale exsolution in hematite-ilmenite on the acquisition of stable natural remanent magnetization, *Earth and Planetary Sciences Letters*, **224**, 461-475.
- Kassim J. Baird T., Fryer J.R., (1982), Electron microscope studies of iron corrosion products in water at room temperature, *Corros Sci.*, **22**, 147-158
- King, J., S. K. Banerjee, and J. Marvin (1982), A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials: Some results from lake sediments, *Earth Planet. Sci. Lett.*, **59**, 404–419, doi:10.1016/0012-821X(82)90142-X.
- Kletetschka G., Ness N.F., Connerney J.E.P., Acuna M.H., Wasilewski P.J.; (2005), Grain size dependence potential for self generation of magnetic anomalies on Mars via thermomagnetic acquisition and magnetic interaction of hematite and magnetite, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **148**, 149-156.
- Kletetschka G., Banerjee S.K., (1995), Magnetic Stratigraphy of Chinese loess as a record of natural fires, *Geophysical Research Letters*,
- Klitgord y Mammerick, (1982)=? Klitgord,K.D., Mammerickx,J.,(1982), Northern East Pacific Rise: Magnetic Anomaly and Bathymetric Framework, *Journal of Geophysical Research*, **87**, 6725-6750
- Kovda I., Mora C., Wilding L., (2006), stable isotope compositions of pedogenic carbonates and soil organic matter in a temperate climate Vertisol with gilgai, southern Russia, *Geoderma*, **136**, 423-435
- Kosmas C.S., Franzmeier D.P., Schulze D.G., (1986), Relationship among derivative spectroscopy, color, crystalline dimensions and Al substitution of synthetic goethites and hematites, *Clays and Clay Minerals*, **34**, 625-634.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Kruvier P.P., Passier H.F., (2001),** Coercivity analysis of magnetic phases in sapropel S1 related to variations in redox conditions, including an investigation of S ratio, *Geochemistry, Geophysics Geosystem*, **2001GC000181**.
- Kukla G., Heller F., Liu X.M., Xu T.C., Liu T.S., An Z.S., (1988),** Pleistocene Climates in China Dated by Magnetic Susceptibility, *Geology*, **No. 16**, pp 811-814.????
- Kumaravel V., Sangode S.J., Siddaiah N.S., Kumar R., (2010),** Interrelation of magnetic susceptibility, soil color and elemental mobility in the Pliocene–Pleistocene Siwalik paleosol sequences of the NW Himalaya, India, *Geoderma*, **154**, 267–280

L

- Lagroix F., (2004),** Contribution from rock Magnetism to Central Alaskan Loess Deposits and Titanium Rich Compositions of Hematite-Ilmenite Solid Solution Series, *Phd Thesis, University of Minnesota*, 270p.
- Lagroix F., Banerjee S.K.; (2002),** Paleowind directions from the magnetic fabric of loess profiles in central Asia, *Earth and Planetary science letters*; **195**; 99-112.
- Lagroix F., Banerjee S.K.; (2002b),** 150,000 Years of Climate and Surface Circulation in Central Alaska, *Fundamental Rock Magnetism and Environmental Applications; Quaderni di Geofisica*; vol. **26**, pp 85-87;
- Lange, R., Carmichael, I.S.E., (1991),** A potassic volcanic front in western México: lamprophyric and related lavas of San Sebastian, *Geological Society of America Bulletin*, **103**, 928–940.
- Le Borgné E., (1955),** Susceptibilité Magnétique Anormal de Sol Superficiel, *Ann. Geophys.*, **11**, 399-419.
- Le Borgne E., (1960),** Etude Experimentale du Trainage Magnetiques Dans le Cas d'un Ensemble de Grains Magnetiques Tres Anormale du Sol Superficiel, *Annales de Geophysique*, **16**, 445-494.
- León R.Y.E., (2010),** Inestabilidad ambiental en el valle de Teotihuacán en la transición Pleistoceno-Holoceno y su impacto en la dinámica reciente, *Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM*, 61p.
- Li G., Xia D., Jin M., Jia J., Liu J., Zhao S., Wen Y., (2014),** Magnetic characteristics of loesspaleosol sequences in Tacheng, northwestern China, and their paleoenvironmental implications, *Quaternary International*, **1-10**, en prensa
- Liu H., Lu B., Wei Y., Sunn Y., (2009),** Transformation of ferrihydrite in presence or absence of trace Fe(II): The effect of precipitation procedures of ferrihydrite, *Journal of Solid Chemistry*, **182**, 1767-1771
- Li J., Yue L., Pan F., Zhang R., Xi R., Guo L., (2014),** Intensified aridity of the Asian interior recorded by the magnetism of red clay in Altun Shan, NE Tibetan Plateau, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **411**, 30–41
- Li S.Y., Chen Z.S., Liu J.C., (1998),** Subalpine loamy Spodosols in Taiwan: characteristics, micromorphology and genesis, *soil Sci. soc. Am. J.*, **62**, 710-716.
- Lilienfein J., Wilcke W., Ayarza M.A., Vilela L., do Carmo-Lila S., Zech W., (2000),** Soil acidification in Pinus caribea forest on Brazilian savanna Oxisols, *Forest Ecology and Management*, **128**, 145-157.
- Lindquist A.K., Feinberg J. M., Waters M.R., (2011),** Rock magnetic properties of a soil developed on an alluvial deposit at Buttermilk Creek, Texas, USA, *G³*, **12**, 1-11, Q12Z36, doi:10.1029/2011GC003848
- Liu C., Yang S., Weiguo Z., (2012),** Magnetic properties of sediments from major rivers, aeolian dust, loess soil and desert China, *Journal of Asian Earth Sciences*, **45**, 190-200.
- Liu Q., Barrón V., Torrent J., Eeckhout S.G., Deng C., (2008),** Magnetism of intermediate hydromagnetite in the transformation of 2-line ferrihydrite into hematite and its paleoenvironmental implications, *Journal of Geophysical Research*, **113**, B01103, doi:10.1029/2007JB005207
- Liu, Q. S., M. J. Jackson, Y. J. Yu, F. H. Chen, C. L. Deng, and R. X. Zhu (2004b),** Grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess/paleosols, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L22603, doi:10.1029/2004GL021090.
- Liu, Q.S., Deng, C.L., Yu, Y., Torrent, J., Jackson, M.J., Banerjee, S.K., Zhu, R.X., (2005),** Temperature dependence of magnetic susceptibility in argon environment: implications for pedogenesis of Chinese loess/paleosols, *Geophys. J. Int.* **161**, 102–112
- Liu Q., Deng Ch., Torrent J., Zhu R., (2007),** Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess, *Quaternary Science Reviews* **26**, 368–385
- Liu Q., Hu P., Torrent J., Barrón V., Zhao X., Jiang J., Su Y., (2010a),** Environmental magnetic study of a Xeralf chronosequence in northwestern Spain: Indications for Pedogenesis, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **293**, 144–156
- Liu Q., Jackson M.J., Yu Y., Chen F., Deng Ch., Zhu R., (2004),** Grain size distribution of pedogenic magnetic particles in Chinese loess/paleosols, *Geophysical Research Letters*, **31**, L22603, doi:10.1029/2004GL021090
- Liu Q., Sun Y., Qiang X., Tada R., Hu P., Duan Z., Jiang Z., Liu J., Su K., (2015),** Characterizing magnetic mineral assemblages of surface sediments from major Asian dust sources and implications for the Chinese loess magnetism, *Earth, Planets and Spac*, **67**:61
- Liu Q., Torrent J., Morrás H., Hong A., Jiang Z., Su Y., (2010b),** Superparamagnetism of two modern soils from the northeastern Pampean region, Argentina and its paleoclimatic indications, *Geophysical Journal International*, **183**, 695–705 doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04786.x
- Liu Q., Zhang Ch., Torrent J., Barrón V., Hu P., Jiang Z., Duan Z., (2016),** Factors controlling magnetism of reddish Brown soil profiles from calcarenites in southern Spain: Dust input or In-situ Pedogenesis?, *Frontiers in Earth Sciences*, **4**, 51, doi:10.3389/feart.2016.00051
- Liu, T. S. (1985),** Loess and the Environment, *China Ocean Press, Beijing*.
- Liu X. M., Rolph T., An Z.; Hesse P.; (2003),** Paleoclimatic significance of magnetic properties on red clay underlying the loess and paleosols in China, *Palaeogeography, paleoclimatology, paleoecology*; **199**; 153-166.
- Liu Z., Liu Q., Torrent J., Barrent V., Hu P., (2013),** Testing the magnetic proxy $\chi_{FD}/HIRM$ for quantifying paleoprecipitation in modern soil profiles from Shaanxi Province, *China, Global and Planetary Change*, **110**, 368–378
- Liu, C.C., Deng, C.L., Liu, Q.S., (2012b),** Mineral magnetic studies of the vermiculated red soils in southeast China and their paleoclimatic significance, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **329–330**, 173–183.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Liu, Q.S., Roberts, A.P., Larrasoana, J.C., Banerjee, S.K., Guyodo, Y., Tauxe, L., Oldfield, F., (2012c), Environmental magnetism: principles and applications, *Rev. Geophys.* **50**, RG4002.
- Logworth G., Becker L.W., Thompson R., Oldfield F., Dearing J.A., Rummery T.A., (1979), Mossbeaur effect and magnetic studies of secondary iron oxides in soils, *Journal Soil Scientific*, **30**, 93-110
- Lounejeva, B.E., Morales, P.P., Cabadas, B.H., Cienfuegos, A.E., Sedov, S., Vallejo, G.E., Solleiro, R.E., (2007), Late Pleistocene to Holocene environmental changes from $\delta^{13}C$ determinations in soils at Teotihuacan, Mexico, *Geofísica Internacional*, **45**, 2, 85-98.
- Lovely D.R., Stolz J.F., Nord G.L., Phillips E.J.P., (1987), Anaerobic Production of magnetite by dissimilatory iron reducing microorganism, *Nature*, **330**, 252-254
- Lu H., Liu D., Liu T., (2001), The effect of C3 and C4 plants for the magnetic susceptibility signal in soils, *Science in China (Series D)* **44**, 4.
- Lucas R.E., Davis J.F., en Donahue R.L., Miller R.W., Shickkluna J.C., 1981, *Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas*, Prentice/Hall, Madrid 1970
- Lu S.G., (2000), Lithological Factors Affecting Magnetic Susceptibility of Subtropical Soils, Zhejiang Province, *China, Catena*, pp 359-373.
- Lu S.G., Chen D.J., Wang S.Y., Liu Y.D., (2012), Rock Magnetism investigations of highly magnetic soil developed on calcareous rock in Yun Gui Plateau: Evidence for pedogenic magnetic minerals, *Journal of Applied Geophysics*, **77**, 39-50.
- Lu S.G., Xue Q.F., Zhue L., Yu J.Y., (2008), Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China, *Catena*, **73**, 23-33.
- Lu S. G., Bai S. Q., Xue Q. F., (2007), Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: a case study from the city of Luoyang, China, *Geophys. J. Int.* (2007) **171** (2): 568-580, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03545.x
- Lu, S.G., Yu X., Chen Y., (2016), Magnetic properties, microstructure and mineralogical phases of technogenic magnetic particles (TMPs) in urban soils: Their source identification and environmental implications, *Science of The Total Environment*, **543**, A, 239-247

M

- Macías J.L., (2005), Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México, *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, **57**, 3, 379-424.
- Macías J.L., (2007), Geology and eruptive history of some active volcanoes of México, *Geological Society of America Special Papers*, **422**, 183-232
- Macías, J.L., García, P.A., Arce, J.L., Siebe, C., Espíndola, J.M., Komorowski, J.C., Scott, K. (1997), Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlán volcanoes, Central Mexico, *BYU Geology Studies*, **42**, 12, 493-528.
- Macias, V. R. (2006), *Avalancha de escombros producida por el colapso de la porción S-SE del volcán Zempoala*, Tesis de licenciatura. Unidad Académica de Ciencias de la Tierra Taxco el Viejo, Guerrero, Universidad Autónoma de Guerrero. 95.
- McKeague, J.A. & Day, J.H., (1966), Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils, *Can. J. Soil Sci.*, **46**(1), 13-22.
- McElhinny M.W., McFadden P.L., (2000), *Paleomagnetism Continents and Oceans*, Academic Ocean Press, 386p
- Maher B. A., (1986), Characterisation of Soils by Mineral Magnetic Measurements, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Elsevier Published, Netherlands, **42**, 76-92.
- Maher B. A., (1998), Magnetic Properties of Modern Soils and Quaternary Loessic Paleosols, *Paleoclimatic*
- Maher B. A., Taylor R., (1988), Formation of Ultrafine-Grained Magnetite in Soils, *Nature*, **336**, 368-370.
- Maher B. A., Thompson R., (1991), Mineral Magnetic Record of the Chinese Loess and Paleosols, *Geology*, **19**, 3-6.
- Maher B. A., Thompson R., (1999), Quaternary Climates, Environments and Magnetism, *Cambridge University Press*, 1a Edición, Cambridge, 390p.
- Maher B.A., (1988), Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites, *Geophysical Journal International*, **94**, 1, 83-96, doi: 10.1111/j.1365-246X.1988.tb03429.
- Maher B.A., Alekseev A., Alekseeva T.; (2003), Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: Climatic dependence of pedogenic magnetite formation, *Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology*, **201**; 321-341.
- Maher, B.A., Karloukovski, V.V. & Mutch, T.J. (2004), High-field remanence properties of synthetic and natural submicrometre haematites and goethites: significance for environmental contexts, *Earth Planet. Sci. Letts.*, **226**, 491-505
- Maher, B.A., Alekseev, A., Alekseeva, T., (2002), Variation of soil magnetism across the Russian steppe: its significance for use of soil magnetism as a palaeorainfall proxy, *Quaternary Science Reviews*, **1571-1576**.
- Maher, B.A., Thompson, R., (1992), Paleoclimatic significance of the mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosol, *Quaternary Research* **37**, 155-170.
- Maher, B.A., Thompson, R., (1995), Paleorainfall Reconstructions From Pedogenic Magnetic Susceptibility Variations in the Chinese Loess and Paleosol, *Quaternary Research*, **44**, 383-391.
- Maier G., Scholger R., (2004), Demonstration of connection between pollutant dispersal and atmospheric boundary layers by use of magnetic susceptibility mapping, St. Jacob (Austria), *Physics and Chemistry of the Earth*, **29**, 997-1009.
- Malucelli, F., Terribile, F., Colombo, C., 1999, Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of andosols on the Island of Sao Miguel (Azores), *Geoderma*, **88**, 73-98
- Martin del Pozzo A.L. (1987), Monogenetic volcanism in Sierra Chichinautzin, México, *Bullet of Vulcanology*, **45**(1): 9-24.
- Martin del Pozzo (1989) Martin Del Pozzo, A. L., Morales Puente, P., Casar Aldrete, I. y Urrutia Fucugauchi, *Strontium Isotopic Ratios and Geochemical Data from the Chichinautzin Monogenetic Field Basin of Mexico- Crustal Structure and Composition of the Magmatic Arc. Litosf.* **2**, 1, 17-23, 1989.
- Martín del Pozzo, A.L., Córdova, C., López, J., (1997), Volcanic impact on the southern Basin of Mexico during the Holocene, *Quaternary International* **43/44**, 181-190.
- Martínez G.F., López B.J., (2005), Caracterización de las unidades ambientales del Glacis de Buenavista, Morelos, mediante la aplicación del enfoque geomorfológico morfogenético, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, **58**, 34-53.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Martínez P. E.E., (2009),** *Propiedades Magnéticas y sus Relaciones con Metales Pesados y Elementos Mayores en Suelos Superficiales del Valle de México, Tesis de Licenciatura, F.I., UNAM, 74.*
- Matzka J., Maher B.A., (1999),** *Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates, Atmos. Environ., 33, 4565–4569.*
- Maxbauer D.P., Feinberg J.M., Fox D.L., (2016),** *Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods, Earth Sciences Review, 145, 28-48.*
- McClung de Tapia, E., Dominguez-Rubio, I., Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., (2005),** *Radiocarbon dates from soil profiles in the Teotihuacan valley, Mexico: Indicators of Geomorphological Processes, Radiocarbon, 47, 159-175.*
- McClung de Tapia, E., Solleiro-Rebolledo, E., Gama-Castro, J., Villalpando, J.L., Sedov, S., (2003),** *Paleosols in the Teotihuacan valley, Mexico: Evidence for paleoenvironment and human impact, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 20, 270-282.*
- Mendoza R. A.T., De la Cruz R.S., (2010),** *Estimación preliminar del peligro volcánico para el campo monogenético Chichinautzin, Memorias Coloquio Interacción de diversas Disciplinas científicas en las Ciencias de la Tierra, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM, 43-45p*
- Meriggi L., Macías J.L., Tommasini S., Capra L., Conticelli S., (2008),** *Heterogeneous magmas of the Quaternary Sierra Chichinautzin volcanic field (central Mexico): the role of an amphibole-bearing mantle and magmatic evolution processes, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 25, 2, 197-216.*
- Mizota C., Van Reuwijk L.P., (1989),** *Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic in diverse climatic regions, Soil monograph 2, ISRIC, Wageningen, 186 p*
- Mitov, I., Paneva, D., Kunev, B., (2002),** *Comparative study of the thermal decomposition of iron oxyhydroxides, Thermochemica Acta, 386, 2, 22, 179–188*
- Mooser, F., (1975),** *Historia geológica de la Cuenca de México, En: Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, México D.F., Departamento del Distrito Federal, Tomo I, 7-38.*
- Mooser, F., Montiel A., Zuñiga, A., 1996,** *Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México. Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos, 1:100000: México, Comisión Federal de Electricidad 1937-1996, Carta Texcoco, 5b, 1 mapa.*
- Morales C.J.J., (1995),** *Determinación de paleointensidades del campo geomagnético para el cuaternario en la Sierra Chichinautzin, Tesis de Maestría, Colegio de Ciencias y Humanidades, Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado, UNAM, 85p*
- Morris R.V., Golden D.C., Shelfer T.D., Lauer H.V. Jr; (1998),** *Lepidocrocite to maghemite to hematite: a pathway to magnetic and hematitic Martian soil; Meteorics & Planetary Science, vol 33, 4; pp 743-751*
- Morton B.O., Hernandez E., Martínez P.E., Soler A.A.M., Lozano S.C.R., Gonzalez H. G., Beramendi O.L., Urrutia F.J., (2009),** *Mexico City topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility, Geoderma, doi:10.1016/j.geoderma.2009.03.019*
- Moskowitz B.M.,** *Hitchhiker's Guide to Magnetism; (Online),*
- Munsell Soil Charts, (2000),** *Macbeth Division of Kollmorgen.*
- Murad E., Fischer W.R., (1985),** *The Geobiochemical cycle of iron, 1-8, in: Stucki J.W., Goodman B.A., Schwertmann (Eds), Iron in soils and Clay minerals, NATO ASI Series C217, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands*

N

- Nelson S.A., (1980),** *The Geology and Petrology of Volcan Ceboruco, Nayarit, Mexico, Geological Society of America Bulletin, 2, 91, 2290-2431.*
- Nederlof M.M. Van Riemsdijk W.H., (1995),** *Effect of Natural Organic Matter on pH on the Bioavailability of Metal Ions in Soils, en Environmental impact of soil component interactions, metals, other inorganics, and microbial activities, II, Eds Huang P.M., Berthelin J., Bollang J.M., McGill C.R.C Press, 285p*
- Nordt L., Driese S., (2010),** *New weathering index improves paleorainfall estimates from Vertisols, Geology, 38, 5, 407-410*
- Nordt L., Wilding L., Lynn W., Crawford C., (2004),** *Vertisol genesis in a humid climate of the coastal plain of Texas, USA, Geoderma, 122, 83-102*
- NRCS-USDA, (2012),** *Field Book for Describing and Sampling Soils, Natural Resources Conservation Service (NRCS)-U.S. Department of Agriculture (USDA), 300.*

O

- O'Reilly W., (1984),** *Rock and Mineral Magnetism, Bloekier, 1a Edición, New York, 220p.*
- Oches E., Banerjee S., (1996),** *Rock Magnetic Proxies of Climate Change from Loess-Paleosol Sediments in Czech Republic, Studia Geophysica et Geodaetica, 41, 287-300.*
- Oldfield F., (1991),** *Environmental Magnetism-A personal Perspective, Quaternary Science Review, 10, 73-85.*
- Oldfield F., Barnoky C., Leopold E., Smith J., (1983),** *Mineral magnetic on lake sediments: a brief review, Hidrobiología, Proceedings of the 3rd International Symposium on Palaeolimnology, 103, 33-44.*
- Oldfield F., Bloemendal J., (2011),** *Rock-magnetic properties confirm the eolian origin of Miocene sequences from the west of the Chinese Loess Plateau, Sedimentary Geology, 234, 70–75*
- Oldfield F., DearIng, J.A., Thompson R., Garret J.S., (1978),** *Some magnetic properties of lake sediments and their possible links with erosion rates, Polish. Arhive, of Hidrobiología, 25, 321-331.*
- Oldfield, F., Hunt, A., Jones, M. D. H., Chester, R., Dearing, J. A., Olsson, L. Prospero, J. M., (1985),** *Magnetic differentiation of atmospheric dusts, Nature 317, 516-518.*
- Oorschot I.H.M.V., (2001),** *Chemical distinction between lithogenic and pedogenic iron oxides in environmental magnetism, Faculteit Aardwetenschappen, Universiteit Utrecht, 200p.*

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Opdyke N.D., Channell J.E.T., (1996), *Magnetic Stratigraphy*, 64 *International Geophysics series*, Academic Press, 346p
- Orgeira M.J., Pereyra F.X., Vásquez C., Castañeda E., Compagnucci R., (2008), Rock magnetism in modern soils, Buenos Aires Province, Argentina, *Journal of South American Earth Sciences* 26, 217–224
- Ortega G. B., Gabriel V., Caballero M., Isralde L., Lozano G. S., Schaaf P., Torres E., (2010), Late Pleistocene: Holocene Record of Environmental Changes in Lake Zirahuén, Central Mexico, *J. Paleolimnology*, 44, 745-760.
- Ortega G. F., Mitre S. L., Róldan Q. J., Aranda G. J.J., Moran C. D.J., Alaniz A.S.A., Nieto S. A.F., 1992. Carta Geológica de la República Mexicana, 5ª ed., escala 1:2000,000, México, D.F., UNAM, Instituto de Geología, Secretaría de Energía, Minas e Industrias Paraestatales, Consejo de Recursos Naturales, 1 mapa, texto explicativo, 74.
- Ortega G., B., Sedov, S., Solleiro R. E., Soler A. A., (2004), Magnetic mineralogy in Barranca Tlalpan exposure paleosols, Tlaxcala, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 21(1), 120-132.
- Ortega G.B., Lozano G. Ma. S., Caballero M., Herrera H.D.A., (2015), Historia de la evolución deposicional del lago de Chalco, México, desde el MIS 3, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67, 2, 185-201.
- Ortiz P. M.A., (1978), Estudio geomorfológico del Glacis de Buenavista, Edo. Morelos, *Boletín*, 8, Instituto de Geografía, UNAM, 25-40.
- Ortiz (1977), Estudio geomorfológico del Glacis de Buenavista, Estado de Morelos, *Boletín del Instituto de Geografía*. 8: 25-40.
- Otake T., Wesolowski D.J., Anovitz L. M., Allard L.F., Ohmoto H., (2007), Experimental evidence for non-redox transformations between magnetite and hematite under H₂-rich hydrothermal conditions, *Earth and Planetary Science Letters*, 257, 60-70
- Ouyang T., Tang Z., Zhao X., Tian Ch., Ma J., Wei G., Huang N., Li M., Bian Y., (2015), Magnetic mineralogy of a weathered tropical basalt, Hainan Island, South China, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 240, 105–113
- Ovalles V.F., (2003), El Color del Suelo: definiciones e interpretación, CENIAP, 3, Maracay, Aragua, Ven., http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/ceniaphoy/articulos/n3/texto/fovalles.htm
- Ozdemir O., Dulop D.J., (2000), Intermediate magnetite formation during dehydration of goethite, *Earth and Planetary Science Letters*, 177, 59-67
- Ozdemir O., Dulop D.J., Mozkowitz B., (1993), The effect of oxidation on Verwey transition in magnetite, *Geophysical Research Letters*, 20, 16, 1671-1674
- Ozdemir y Dunlop, 2005;

P

- Pal D., Wani S., Sahrawat k., (2012), Vertisol of tropical Indian environments: pedology and edaphology, *Geoderma*, 189-190, 28-49
- Palacios P.J.L., (1982), Análisis geomorfológico de la región de Cuernavaca-Tenango-Ixtapa de la sal, Estados de México y Morelos, *Tesis de Maestría; Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.*
- Pan Y., Liu Q., Deng C., Qin H., Zhu R., (2006), Thermally induced inversion of Al-substituted titanomagnetite in basalts: Evidence for partial seriff-reversal, *Journal of Geophysical Research*, 111, B12S29, doi:10.1029/2006JB004576,2006
- Peacock S. y D. Rimmer. 2000. The suitability of an iron oxide-rich gypsum by-product as a soil amendment., *J. Environ. Quality*, 29(6), 1969-1975.
- Pedraza G.J., (1986), *Geomorfología General, Principios, Metodología y Aplicaciones, Ed. Rueda Madrid, 414*
- Peluco R.G., Marques J.J., Siqueira D.S., Cortez L.A., Pereira G.T., (2013), Magnetic susceptibility in the prediction of soil attributes in two sugarcane harvesting management systems, *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.33, n.6, p.1134-1143
- Peliüer (1950) en Huggett (2007) *Fundamentals of Geomorphology, (online)*
- Peters C., Churh M.J., Coles G., (2000), Mineral Magnetism and Archeology at Galson on the Isle of Lewis, Scotland, *Phys.Chem. Earth (A)*, 25, 5, 455-460.
- Peters C., Dekkers M.J., Langereis C.G.; (2002), Validation of mineral magnetic methods; Fundamental rock magnetism and environmental applications, *Quaderni di Geofisica*; 26; 129-130.
- Peters C., Dekkers M.J.; (2003), Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy, concentration and grain size, *Physics and Chemistry of the Earth*; 28; pp. 659-667.
- Peters C., Thompson R.; (1998), Magnetic identification of selected natural iron oxides and sulphides, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 183, pp 365-374.
- Pilchin N.A., Eppelbaum V.L., (2006), *Iron and its unique role in Earth evolution, Monografías del Instituto de Geofísica, 9, Universidad Nacional Autónoma de México, 68p.*
- Porsch K., Rijal M.L., Borch T., Troyer L.D., Behrens S., Wehland F., Appel E., Kappler A., (2014), Impact of organic carbon and iron bioavailability on the magnetic susceptibility of soils, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 128, 44–57
- Porta C. J., López A. R. M.; (1994), Edafología para la agricultura y el medio ambiente, Ed. Mundi-Prensa, 807 p.
- Porta C.J., López A.M., Roquero de Laburu C., (1999), Edafología para la agricultura y el medio ambiente, 2ª Edición revisada y ampliada Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 849p.

Q

- Quinton E., (2011), *Magnetic Analysis of Soils from the Wind River Range, Wyoming, Tesis de Licenciatura, Trinity College, 30p.*

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía**R**

- Rankey E.C., Farr M.R., (1997), Preserved pedogenic mineral magnetic signature, Pedogenesis, and paleoclimate change: Pennsylvanian Roca Shale (Virgilian, Asselian), Central Kansas, USA, *Sediment Geology*, **114**, 11-32
- Resende M., Allan J., Coey J.M.D., (1986), The magnetic soils of Brazil, *Earth and Planetary Sciences Letters*, **78**, 322-326.
- Retallack G.J., Sheldon N.D., Cogoini M., Elmore R.D.; (2003), Magnetic susceptibility of early Paleozoic and Precambrian paleosols, *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, **198**; 373-380.
- Reynolds, R.L., King J.W., (1995), Magnetic records of climate change, *Reviews of Geophysics*, **33**, suppl.
- Righler K., Carmichael I.S.E., Becker T., (1995), Pliocene-Quaternary volcanism and faulting at the intersection of the Gulf of California and the Mexican volcanic Belt, *Geol. Soc. Am. Bulletin*, **107**, 612-626.
- Righler K., Carmichael S.E., (1992), Hawaai test and related lavas in the Atenguillo graben western Mexican volcanic belt, *Soc. Am. Bull.*, **104**, 1592-1607
- Rivas O.J.F., (2003), *Propiedades Magnéticas de Paleosuelos Cuaternarios del Nevado de Toluca y su Aplicación en la Reconstrucción Paleoambiental, Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería/Instituto de Geofísica, UNAM.*
- Rivas O.J.F., (2006), Análisis de Magnetismo de Rocas en Paleosuelos Pleistocénicos de Origen Volcánico y Eólico, como Herramienta Alternativa en la Reconstrucción Paleoambiental, *Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica, UNAM.*
- Rivas O.J.F., (2010), Análisis de Propiedades de Magnetismo de Rocas de Suelos volcánicos Modernos: Un registro de Condiciones Ambientales y Evolución Pedogenética, *Memorias del Coloquio: Interacción de Diversas Disciplinas Científicas en las Ciencias de la Tierra. UNAM, Posgrado (Ciencias de la Tierra)*, 65-68.
- Rivas O.J.F., Ortega G.B, Sergey S., Solleiro E., Svetlana S., (2006), Rock Magnetism and Pedogenetic Processes in Luvisol profiles: Examples From Central Russia and Central Mexico, *Quaternary International*, **156/157**, 212-223.
- Rivas O.J.F., Ortega G.B., Solleiro R.E., Sedov S., Sanchez S., (2012), Mineralogía Magnética de Suelos de una Toposecuencia del Valle de Teotihuacán, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **64**,1,
- Rivas O.J.F., Vázquez C. G., Ortega G. B., (2012), Environmental Magnetism Study of western Mexico Volcanic Soils and their Relationship with Lake Sediments, *Cordilleran Section - 108th Annual Meeting (29-31 March 2012)*, GSA, *Abstracts with Programs*, **44**, 3, 67
- Rivera U.M.Y., (2008), Impacto del Desarrollo Cultural Prehispánico en la Cubierta Edáfica del Valle de Teotihuacán, *Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geología, UNAM.*
- Rivera U.M.Y., Sedov, S., Solleiro R.E., Pérez P.J., McClung de Tapia E., González, A., González A., Gama C.J., (2007), Degradación ambiental en el valle Teotihuacan: evidencias geológicas y paleopedológicas, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **59**, 203-217
- Rixiang Z., Mian L., Yongxin P., (1999), History of the temperature-Dependence of susceptibility and its implications: Preliminary results along an E-W transect of the Chinese Loess Plateau, *Chinese science Bulletin*, **44**, sup., 81-86.
- Robinson S.G., (1986b), The late Pleistocene paleoclimatic record of North Atlantic deep sea sediments revealed by mineral-magnetic measurements, *Physic Earth Planetary Interior*, **42**,
- Rochette P., Lorand J.P., Fillion G., Sautter V., (2001), Pyrrhoite and the remanent magnetization of SNC meteorites: a changing perspective on Martian magnetism, *Earth Planetary Science Letters*; **190** (1-2), 1-12.
- Rzedowski J., (1978), *Vegetación de México, Limusa, México, D.F.* 432p.

S

- Safiuddin L.O., Haris V., Wirman R.P., Bijaksana S., (2011), A Preliminary Study of the Magnetic Properties on Laterite Soils as Indicators of Pedogenic Processes, *LATINMAG Letters*, **1**,1-15.
- Salcido B. C., (2012), Paleosuelos Aluviales del cuaternario Tardío en el Altiplano central de México. Un Ensayo del Escenario Paleoclimático del Poblamiento Temprano, *Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Sánchez, en preparación*
- Sánchez D.A., Bautista F., Gogichaishvili A., Reyes L., J.A., Solís D. F.A., Romero H S., Herrera M. A., Sánchez L. M.I., Cejudo R.R.; Morales C.J.J., (2016), Aumento magnético en suelos superficiales de la conurbación binacional Mexicali-Calexico, *Latinmag Letters*, **6**, *Special Issue, D19*, 1-7, *Proceedings São Paulo, Brasil*
- Sánchez P. S., (2015), Los Paleosuelos "negros" como indicadores de cambios ambientales naturales e inducidos por el hombre en el periodo de ocupación Teotihuacano, *Tesis doctoral, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM*, 147p
- Sandoval, B.A., (1987), Actualización y análisis cartográfico sobre usos de suelo y vegetación del Parque Nacional Nevado de Toluca, Estado de México, *Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura*, 125 p
- Sangode S.J., Bloemendal J., (2004), Pedogenic transformation of magnetic minerals in Pliocene–Pleistocene palaeosols of the Siwalik Group, NW Himalaya, India, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **212**, 95–118
- Sangode S.J., Kumaravel V., Bloemendal J., Kumar R., (2008), Effect of burial and compaction on soil magnetic properties: Results from soil-paleosol sequences in the Himalayan Foreland, India, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **267**, 235–244
- Sartori M., Evans M.E. Heller F., Tsatskin A., Han J.M., (2005), The last glacial/interglacial cycle at two sites in the Chinese plateau: Mineral magnetic, grain size and 10 Be measurements and estimates of paleoprecipitation, *Palaeo (en prensa)*.
- Sartori M., Heller F., Foster T., Borkovec M., Hammann J., Vincent E., (1999), Magnetic Properties of loess grain size fractions from the section at Paks (Hungary), *Physics of the Earth and Planetary Interiors*; **116**; 53-64.
- Scheinost A.C., Schwertmann U., (1999), Color identification of iron oxides and hydroxysulfates: Use and limitations, *Soil Science Society American Journal*, **63**, 1463-1471
- Schmidt A., Yamold R., Hill M., Ashmore M., (2005), Magnetic susceptibility as proxy for heavy metal pollution: a site study, *Journal of Geochemical Exploration*, **85**, 109-117

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Schneider J., Wallb H., Kontnya A., Bechstada T., (2004), Magnetic susceptibility variations in carbonates of the La Vid, Group (Cantabrian Zone, NW-Spain) related to burial diagenesis, *Sedimentary Geology*, **166**, 73–88.
- Schwertmann, U. (1990), Some properties of soil and synthetic iron oxides. pp. 57-84. In: De Boodt, M.F., M.H.B. Hayes yA. Herbillon (eds.). Soil colloids and their associations in aggregates. NATO ASI Series B214. D. Reidel Publishing Company. Dordrecht, The Netherlands.
- Schwertmann U., (1985), The effect of pedogenic environments on iron oxides minerals, *Adv. Soil, Science*, **1**, 172-200.
- Schwertmann U., (1991), Solubility and dissolution of iron oxides, *Plant and Soil*, **130**, 1-2,1-25
- Schwertmann, U., 1988, Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments, en Stucki, J.W., Goodman, B.A., Schwertmann, U. (eds.), *Iron in Soils and Clay Minerals: Dordrecht, Países Bajos, D. Reidel Publishing*, 267-308.
- Schwertmann U., (1988a), Goethite and Hematite formation in presence of clay minerals and gibbsite at 25°C, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **52**, 288-291
- Schwertmann U., (1993), Relationships between iron oxides, soil color and soil formation, *soils Science society of America*, **51**-69.
- Schwertmann U., Fischer W.R., (1973), Natural "Amorphous" Ferric Hydroxide, *Geoderma* **10**, 237-247.
- Sedov S., Solleiro R.E., Gama C.J.E., Vallejo E., González A., (2001), Buried paleosols of the Nevado de Toluca: An alternative Record of Late Quaternary Environmental Change in Central Mexico, *Journal of Quaternary Science*, **16**, 375-389.
- Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Morales-Puente, P., Arias-Herreira, A., Vallejo-Gómez, E., Jasso-Castañeda, C., (2003), Mineral and organic components of the buried paleosols of the Nevado de Toluca, Central Mexico as indicators of paleoenvironments and soil evolution, *Quaternary International*, **106-107**, 169-184.
- Sedov, S., Rivera, Y., Solleiro-Rebolledo, E., (2009), Holocene paleoecology of Teotihuacan, Mexico: micromorphological evidences from alluvial paleosols and pedosediments, *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten Serie D Physische Geographie, Band 30*, 123-131.
- Sedov, S., Lozano-García, S., Solleiro-Rebolledo, E., McClung de Tapia, E., Ortega-Guerrero, B., Sosa-Nájera, S., 2010, Tepexpan revisited: a multiple proxy of local environmental changes in relation to human occupation from a lake shore section in Central Mexico: *Geomorphology*, **122**, 309-322.
- Shoji M.N., Dahlgren R.A., Volcanic Ash soils, (1993), Genesis, properties and utilization, *Developments in soil science*, **21**, Elsevier, 288.
- Siebe C., Arana L. S., Abrams, (2005), Geology and radiocarbon ages of Tláloc, Tlacotenco, Cuauhtzin, Hijo de Cuauhtzin, Teutli, and Ocusacayo monogenetic volcanoes in the central part of the Sierra Chichinautzin, México, *Journal of volcanology and Gethermal Research*, **141**, 225-243.
- Siebe, C., (2000), Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern basin of Mexico City, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* **104**, 45–64.
- Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P., Abrams, M., (2004), Radiocarbon ages of Holocene Pelado, Guespalapa, and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico City: implications for archaeology and future hazards, *Bull. Volcanology*. **66**, 203–225.
- Singer M.J., Verosub K.L., Fine, P., TenPas J., (1996), A Conceptual Model For The Enhancement Of Magnetic Susceptibility in soils, *Quaternary International*, **34-36**, pp. 243-248.
- Singer, M.J., Fine, P., Verosub, K.L., Chadwick, O.A., (1992), Time dependence of magnetic susceptibility of soil chronosequences on the California coast, *Quaternary Research* **37**, 323-332.
- Smolikova L., (1967), Polygenese der fossilen Lössböden der Tschecholorowakei im Lichte mikromorphologischer Untersuchungen, *Geoderma* **1**, 315-324
- Soil Survey Staf, (1999), *Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey; USDA-NRCS Agriculture Handbook 436 (second edition): Washington, D.C., U.S., Government Printing Office*, 869p
- Sokolowska Z., Alekseev A., Skic I., Brzezińska M., (2016), Impact of wastewater application on magnetic susceptibility in Terric Histosol soil, *International Agrophysic*, doi: 10.1515/intag-2015-0064
- Soler A.A.M., Gogichaisvili A., Carracho A., Sedov S., Caballero M.C., Ortega G.B., Solís C.B., Morales J.J., Urrutia F.J., Bautista F., (2015), A Detailed Paleomagnetic and Rock Magnetic Investigation of the Matuyama-Brunhes Geomagnetic Reversal Record in the Tephra-Paleosol Sequences of Tlaxcala (Central Mexico), *Frontiers in Earth Sciences*, **3**, **11**, 1-12.
- Soler A.A.M., Sanchez F., Rodríguez M., Caballero M.C., Gogitchaishvili A., Urrutia F.J., Manzanilla L., Tarling D.H., (2006), Investigación de Archeomagnetismos orientados precolombinos de cal-yeso de Teotihuacan, Mesoamérica, *Planetas Tierra y Espacio* **58**: 1,433-1,439.
- Soler A.A.M., Urrutia F. J., (1994), Regional rigid-bolck rotation, small domain rotation and distributed deformation within the Acambay graben, central Transmexican Volcanic Belt: Paleomagnetic Implications, *Geofísica Internacional*, **33**, **4**, 656-574
- Solís C. B., Solleiro R. E., Sedov S., Salcido B.C., (2012), Paleosuelos en secuencias coluvio-aluviales del Pleistoceno – Holoceno en Tlaxcala: registros paleoambientales del poblamiento temprano en el centro de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **64**, **1**, 91-108
- Solís C.B., (2010), Toposecuencia de Paleosuelos Volcánicos como Herramienta para la Reconstrucción Paleoambiental del Cuaternario Tardío en Tlaxcala, *Tesis de Maestría, Instituto de Geología, UNAM*, 169p.
- Solís C.B., Solleiro R. E., Sedov S., Salcido B. C., (2012), Paleosuelos en secuencias coluvio-aluviales del Pleistoceno-Holoceno en Tlaxcala: Registros paleoambientales del poblamiento temprano en el centro de México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **64**, **1**, 91-108.
- Solleiro R.E., Macías J.L., Gama C. J.E., Sedov S., Sulerzhitsky L.D., (2004), Quaternary Pedostratigraphy of Nevado de Toluca volcano, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **21**, **1**, 101-109
- Solleiro R.E., Sedov S., Gama C.J., Flores R.D., Escamilla S.G., (2003), Paleosol-sedimentary sequences of the Glacis de Buenavista, Central Mexico: Interaction of the Late Quaternary pedogenesis and volcanic sedimentation, *Quaternary International*, **106-107**, 185-201
- Solleiro R.E., Sycheva S., Sedov S., McClung de Tapia E., Rivera U.Y., Salcido B.C., Kuznetsova A., (2010/1), Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, México: Responses to late Quaternary environmental changes, *Quaternary International*, **233**, 40-52
- Solleiro, E., Sedov, S., McClung E., Cabadas H., Gama-Castro J., Vallejo-Gómez E. (2006), Spatial variability of environment change in the Teotihuacan valley during late Quaternary: paleopedological inferences, *Quaternary Internacional* **156-157**: 13-31.

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Solleiro-Rebolledo, E., Sycheva, S., Sedov, S., McClung de Tapia, E., Rivera-Uria, Y., Salcido-Berkovich, C., Kuznetsova, A., (2011), *Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, México: Responses to late Quaternary environmental changes: Quaternary International* 233, 40-52
- Solleiro R., E., Sycheva, S., Sedov, S., McClung de Tapia, E., Rivera U.Y., Sálcido B.C., Kuznetsova, A., 2011, *Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, México: Responses to late Quaternary environmental changes: Quaternary International*, 233, 40–52.
- Solleiro R.E., Sedov S., Cabadas B. H., (2015), *Use of soils and palaeosols on volcanic materials to establish the duration of soil formation at different chronological scales, Quaternary International* 376, 5-18
- Sosa H.E.M., y Alvarado L. P.G., (2010), *Estudio del magnetismo de estructuras estables de pequeños cúmulos de titanio a través de la Teoría de la Funcional de la Densidad, Superficies y Vacío* 23 (2) 27-30.
- Soubrand C.M., Horen H., Courtin N.A., (2009), *Mineralogical and magnetic characterization of iron titanium oxides in soils developed on two various basaltic rocks under temperate climate, Geoderma*, 149, 27–32
- Spassov S., (2002), *Loess Magnetism, Environment and Climate Change on the Chinese Loess Plateau, Phd Thesis, Swiss Federal, Institute of Technology*, 151p.
- Spassov S., Heller F., Kretschmar; Evans M.E, Yue L.P., Nourgliev D.K.; (2003), *Detrital and pedogenic magnetic mineral phases in loess/paleosol sequence at Lingtai (Central Chinese Loess Plateau), Physics of the Earth and Planetary Interiors*; 140; 255-275.
- Stacey, F. D., Banerjee S. K., *Physical Principles of Rock Magnetism, Elsevier, Amsterdam, 1974.*
- Strzyszc Z., Margeira T., Heller F., (1996), *The influence of industrial emissions on the magnetic susceptibility of soils in upper Silesia, Studia Geophysica et Geodetica*, 40, 276-286
- Stober K.C., Thompson R., (1979), *Magnetic remanence acquisition in finnish lake sediments, Geophys J.R. Astron. Soc.*, 57, 727-739
- Stoner J.S., Chanell J.E.T., Hillaire M.C., (1996), *The Magnetic Signature of Rapidly Deposited Detrital Layers From Deep Labrador Sea: Relationship to North Atlantic Heinrich Layers, Paleoceanography* , 11, 3, 309-325.
- Stockhausen, H., Thouveny N. (1999), *Rock-magnetic proper-ties of Eemian maar lake sediments from Massif central, France:A climatic signature?, Earth Planet. Sci. Lett.*, 173, 299–313,doi:10.1016/S0012-821X(99)00237-X.
- Su N., Ye Y.S., Dan W.X., Bi L., Fan Y. C., (2015), *Magnetic Parameters indicate the intensity of chemical weathering developed on igneous rocks in China, Catena*, 133, 328-341.
- Sumegi P., Zoller L., Hambach U., Jovanovic M., Guadenyi T., Oches E.A., Marcovic S.B., (2004), *Paleoclimate Record in the Pleistocene loess-paleosol Sequence at Miseluk (Vojvodina, Serbia), Quaternaire*, 15, 4, 361-368.
- Sun J., Liu T., (2000), *Multiple origins and interpretations of the magnetic susceptibility signal in Chinese wind-blown sediments, Earth and Planetary Science Letters*, 180, 287-296
- Sun W., Banerjee S.K., Hunt C.P., (1995), *The role of maghemite in the enhancement of magnetic signal in the Chinese loess-paleosol sequence: An extensive rock magnetic study combined with citrate-bicarbonate-dithionite treatment, Earth and Planetary Science Letters*, 133, 3–4, 493-505.

T

- Tarbutck E.J., Lutgens F.K., (2000), *Ciencias de la Tierra, Una introducción a la geología física, Prentice Hall, 6ª Ed., España, 560p*
- Targulian V.O., Goryachkin S.V., (2004), *Soil memory: Types of record, carriers, hierarchy and diversity, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21, 1, 1-8
- Targulian, V.O., Sokolova, T.A., 1996, *Soil as a bio-abiotic natural system; a reactor, memory and regulator of biospheric interactions, Eurasian Soil Science*, 29 (1), 34-47.
- Targulian V.O., Krasilnikov P.V., (2007), *Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance, Catena*, 2007, doi:10.1016/j.catena.2007.03.007
- Tarling D. H., (1983), *Paleomagnetism: Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archeology, Chapman and Hall, 1ª Edición, U.S.A.*, 379.
- Tauxe L., (2010), *Essentials of Paleomagnetism, University of California Press*, 489.
- Tauxe L., Bertram H.N., Seberino C., (2002), *Physical interpretation of hysteresis loops: Micromagnetic modeling of fine particle magnetite, Geochemistry Geophysics Geosystems (G3)*, 3, 10, 1-22
- Terhorst B., Appel E. Werner A., (2001), *Paleopedology and Magnetic Susceptibility of Loess-Paleosol Sequence in Southwest Germany, Quaternary International*, 231-240.
- Terhorst B., Ottner F., (2003 a), *Löß-Paläoboden-Sequenzen in Oberösterreich; Tagung des Arbeitskreises "paläoboden" der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Tübinger geowissenschaftliche Arbitten (TGA)*; 155 .
- Terhorst B., Ottner F., (2003 b), *Polycyclic luvisols in Northern Italy: palaeopedological and clay mineralogical characteristics, Quaternary International*; 106/107; 215-231.
- Thompson, R., Edwards, K.J. (1982), *A Holocene palaeomagnetic record and a geomagnetic master curve from Ireland, Boreas* 11, 335–34
- Thompson R., Oldfield F., (1986), *Environmental Magnetism, Allen & Unwin, 1ª Edición, London*, 227.
- Thompson A., Chadwick O., Rancourt D., Chorover J., (2006), *Iron oxides crystallinity increases during soil redox oscillations, Geochim. Cosmochim. Acta*, 70, 1710-1727.
- Tite M.S, Linington R.E., (1975), *Efect of Climate on the Magnetic Susceptibility of soil, Nature*, 256, 565-566.
- Torrent J., Liu Q.S., Barron B., (2010), *Magnetic minerals in Calcic Luvisols (Chromic) developed in a warm Mediterranean region of Spain: Origin and paleoenvironmental significance, Geoderma*, 154, 465–472
- Torrent J., Schwertmann U, Schulze D.G., (1980), *Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrance sequences in Spain, Geoderma*, 23, 191-208

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía

- Torrent J., Schwertmann U, Fechter H., Alferez F., (1983), Quantitative relationship between soil color and hematite content, *Soil Sci*, 136, 354-358**
- Torrent J., Schwertmann U., Barron V., (1987), The reductive dissolution of synthetic goethite and hematite in dithionite, *Clay Minerals*, 22, 3, 329-337.**
- Truog E., 1948, Lime in relation to availability of plant nutrients, *soil sciences*, 65, 1-7.**
- Targulian V.O., Krasilnikov P.V., (2007), Soil system and pedogenic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance, *Catena*, 2007, doi:10.1016/j.catena.2007.03.007**

V

- Van Wambeke, (1992), *Soil of the Tropics Properties and appraisal, McGrawHill* 343.**
- Vazquez E.R., Jaimes P., (1989), Geología de la cuenca de México, *Geofísica Internacional*, 28, 2, 133-189**
- Verosub, K.L., Fine, P., Singer M.J., (1993), Pedogenesis and paleoclimate: Interpretation of the magnetic susceptibility record of the Chinese loess-paleosol sequence, *Geology*, 21, 411-422**
- Virina E.I., Faustov S.S., Heller F., (2000), Magnetism of Loess-Palaeosol Formations in Relation to Soil-Forming and Sedimentary Processes, *Phys. Chem. Earth (A)*, vol. 25, 5, 475-478,**
- Vlag P.A., Kravtsov P.P., Dekkers M.J., (2004), Evaluating climate change by multivariate statistical techniques on magnetic and chemical properties of marine sediments (Azores Region), *Paleogeography, paleoclimatology, paleoecology*; 212; 23-44.**
- Vodyanitskii Y.N., (2010), Iron Minerals in Urban Soils, *Eurasian soil science*, 43, 12, 1410-1417**

W

- Wall H., (2000), The field-dependence of AC susceptibility in titanomagnetites: implications for the anisotropy of magnetic susceptibility, *Geophysical Research Letters*, 27, 16, 2409-2411**
- Wang H., Song Y, Cheng Y, Luo Y, Zhang C., Gao Y., Qiu A, Deng L., Liu H., (2016), Mineral magnetism and other characteristics of sediments from a sub-alpine lake (3080 m a.s.l.) in central east China and their implications on environmental changes for the last 5770 years, *Earth and Planetary Science Letters*, 452, 44-59**
- Wang H., Huo Y., Zeng L., Wu X., Cai Y., (2008), A 42-yr soil erosion record inferred from mineral magnetism of reservoir sediments in a small carbonate-rock catchment, Guizhou Plateau, southwest China, *J Paleolimnol*, 40, 897-921**
- Wang H., Liu H., Zhu J., Yi Y., (2010), Holocene environmental changes as record by mineral magnetism of sediments from Anguli-nuur Lake, southern Inner Mongolia Plateau, China, *Palaeo*, 285, 30-49.**
- Wassmer P., Schneider J.L., Fonfrère A.V., Lavigne F., Paris R., Gomez C., (2010), Use of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) in the study of tsunami deposits: Application to the 2004 deposits on the eastern coast of Banda Aceh, North Sumatra, *Indonesia, Marine Geology*, 275, 255-272.**
- Worm H. U., (1998), On the superparamagnetic—stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility, *Geophys. J. Int.*, 133, 201-206**
- Worm, H.-U., and M. Jackson (1999), The superparamagnetism of Yucca Mountain Tuff, *J. Geophys. Res.*, 104, 25,415-25,425,doi:10.1029/1999JB900285.**
- WRB, (2006), World Reference Base for soils Resources. 2a edición. IUSS working group. Word soil resources report. No. 103. FAO, Roma**
- Working Group WRB, (2014), World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, Update 2015, World Soil, Resources, Reports 106, Food And Agriculture Organization of The United Nations, Rome, 2015**

X

- Xie Q., Chen T., Xu X., Qing C.S., Xu H., Sun Y., JunFeng, J.I., (2009), Transformation relationship among different magnetic minerals within loess-paleosol sediments of the Chinese, Loess Plateau, *Science in China Series D:Earth Sciences*, 52, 3, 313-322**

Y

- Yamazaki T., Ikehara M., (2012), Origin of magnetic mineral concentration variation in the Southern Ocean, *Paleoceanography*, 27, PA2206, 1-13**
- Yao D.Z., Yu J.Y.; (1989), Effect of climate on soil magnetism, *J. Nat*; 12, 11, 865-866.**
- Young A., (1976), Tropical soil and soil survey, Cambridge University Press, London, 468.**

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 8:
Bibliografía**Z**

- Zamotaev, V.O. Targulian, (1994),** *Geography of soil formation and weathering on volcanic islands of the Southwest Pacific Ocean, Eurasian Soil Science, 26, 12–22*
- Zan J., Fang X., Nie J., Yang S., Song Ch., Dai S., (2011),** *Magnetic properties of surface soils across the southern Tarim Basin and their relationship with climate and source materials, Chinese Science Bulletin, 3: 290–296, doi: 10.1007/s11434-010-4210-4.*
- Zan J., Fang X., Yang S., Nie J., Li X., (2010),** *A Rock Magnetic Study of Loess From West Kunlun Mountains, Journal of Geophysical Research, 115, B10101, doi, 10.1029/2009JB007184,*
- Zapata H.R., (2004),** *Química de la acidez del suelo, 1ª Ed., Cali, Colombia, 208p*
- Zetina LR., Pastrana L., Romero J., Jiménez J.A., (2002),** *Manejo de suelos ácidos para la región tropical húmeda de México, Libro técnico, 10, C.E., Papaloapan/C.E., Huimanguillo CIR Golfo centro, 170p.*
- Zhao X., Liu Q., (2010),** *Effects of the grain size distribution on the temperature-dependent magnetic susceptibility of magnetite nanoparticles, Science China Earth Sciences, 53, 7, 1071-1078.*
- Zhao, G., Liu, X., Chen, Q., Lü, B., Chang, L., Niu, H., Li, P., Guo, H., Liu, Z., (2013),** *A long-term increasing aridification and cooling trend at the Chinese Loess Plateau during the Pliocene, Quaternary International, doi: 10.1016/j.quaint.2013.02.025.*
- Zheng H., Oldfield F., Yu L., Shaw J., An Z., (1991),** *The magnetic properties of particle-sized samples from the Luo Chuan bess section: evidence for Pedogenesis, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 68 , 250-258*

ANEXOS

“La prudencia, el buen juicio y la sensatez no dependen de factores meramente cuantitativos de crecimiento, sino de toda una cadena de elementos que se sintetizan en el interior de la persona; para ser más exactos, en el centro de su libertad”

AMORIS LAETITIA
(Santo Padre Francisco)

Capítulo 9

9 Anexos

En este apartado, se presentan la síntesis de datos complementarios obtenidos durante el desarrollo de la presente investigación, que contribuyen a su interpretación, así como el artículo que se ha derivado de resultados parciales de ésta investigación que se presentan en este documento.

Tabla 15.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de la región (1), Valle de Teotihuacán (VT).

Perfil CGBE Cambisol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
Ah ₁	Ti(Mgt) _{~Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Pocos minerales magnéticos, ~ Alto neto. paramagnéticos, ~ Bajo neto. ferrimagnéticos ~ Incremento antiferrimagnéticos	~ MDs ~ (SP + SD), ~ (MD + SP), SP ~ bajo ~ SD decrece, ~ SD/SSD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ D > S ~ Hm > Gth
Ah ₂	Ti(Mgt) _{~Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Incremento neto. minerales magnéticos, ~ Decremento de día/paramagnéticos ~ Incrementan ferri/antiferrimagnéticos	~ SD, SP ~ homogéneo ~ SD/PSD, ~ SD/SSD, ~ MD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ D < S ~ Hm > Gth
Bw	Ti(Mgt) _{~Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Decremento neto. minerales magnéticos, ~ Bajo neto para/diamagnéticos ~ Alto neto. ferrimagnéticos ~ Antiferrimagnéticos	~ MD ó SP, SP ~ aumenta, ~ SD ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ D > S ~ Hm > Gth
Perfil CGN Cambisol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
Ap	Ti(Mgt) _{~Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo neto. minerales magnéticos ~ Alto neto. día/paramagnéticos ~ Constante, alto neto. ferrimagnéticos	~ MDs ~ (SP + SD), ~ (MD + SP), ~ SP ~ SD/PSD, ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros)
Ah	Ti(Mgt) _{~Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo neto. minerales magnéticos ~ Bajo neto. día/paramagnéticos ~ Decremento de ferrimagnéticos	~ MDs~(SP + SD), ~ (MD+SP), SP ~ aumenta ~ PSD, ~ MD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ D < S ~ ΔHm
AB	Ti(Mgt) _{~Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo neto. minerales magnéticos ~ Aumento neto. día/paramagnéticos ~ Decremento de ferrimagnéticos ~ Incremento de Antiferrimagnéticos	~ SD, ~ (SP + MD), SP ~ decrece ~ PSD, ~ MD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ D > S ~ Hm < Gth
BC	Ti(Mgt) _{~Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Alto neto. minerales magnéticos ~ Cre. neto. día/paramagnéticos ~ Incremento de ferrimagnéticos ~ Antiferrimagnéticos	~ SD, ~ MD, SP ~ decrece ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ D > S ~ Hm > Gth

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética inferida a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se muestra: el perfil, la secuencia de horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética (segunda columna). Las características de los parámetros magnéticos de concentración (tercera columna) del tamaño de dominio magnético (cuarta columna), así como de la coercitividad ó dureza (quinta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para establecer variaciones en la concentración, distribución y composición del espectro de coercitvidades, p.ej., Gth y/ó Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)_{~Ti}(titanomagnetita con poco Ti) Mgt,(magnetita), Ti(Mgt)_{~Ti}(titanomagnetita rica en Ti, magnetita), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh (Maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 9:
Anexos

Tabla 15.- (continuación)

Perfil MAS Calcisol	Composición magnético	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
Ap	Ti(Mgt _T /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo neto. minerales magnéticos ~ Alto neto. dia/paramagnéticos ~ Bajo neto. ferrimagnéticos ~Antiferromagnéticos	~ SD, ~ MD < SP, SP ~ variable ~ PSD, ~ SD/SSD, ~ MD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) HM > Gth ~ Mgh
Bk	Ti(Mgt _T /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Aumento neto. minerales magnéticos ~ Variable, alto neto. dia/paramagnéticos ~ Variable, disminución neto. ferrimagnéticos ~Antiferromagnéticos	~ MDs (SP + SD), ~ (MD + SP), ~ MD, SP ~ variable ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ Hmt + Gth ~ ΔHmt ~ Mgh
C	Ti(Mgt _T /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Variable neto. minerales magnéticos ~ Bajo neto. dia/paramagnéticos ~ Aumento neto. ferrimagnéticos ~Antiferromagnéticos	~ SD, ~ SP, aumenta ~ SD/PSD, ~ PSD, ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ Hmt + Gth ~ Hmt aumenta
Perfil SNP Fluvisol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
Ap	Ti(Mgt _T /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Minerales magnéticos ~ Para/diamagnéticos ~ Ferrimagnéticos ~Antiferromagnéticos	~ MDs (SP + SD), ~ (MD + SP), MD > SD, SP ~ decrece ~ SD/PSD PSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ ΔHmt ~ S > D ~ Mgh
C	Ti(Mgt _T /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Cte. neto., Minerales magnéticos ~ Bajo neto. Para/diamagnéticos ~ Aumenta neto. ferrimagnéticos ~Antiferromagnéticos	~ SD, ~ (SP+MD), SP alto, SP ~ aumentan ~ PSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ S > D ~ Hmt + Gth ~ Hmt > Gth
Perfil OTM Fluvisol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
Ap	Ti(Mgt _T /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo neto. minerales magnéticos, ~ Alto neto. para/diamagnéticos, ~ Alto neto ferrimagnéticos ~Antiferromagnéticos	~ MD, ~ SD, SP ~ variable, ~ SP-SP/SD, ~ SD/SSD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S > D ~ ΔHm, ~ ΔH _{CR} Hmt ~ baja
AB	Ti(Mgt _T /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo y variable neto. minerales magnéticos, ~ Bajo neto. paramagnéticos, cte., ~ Aumenta neto., ferrimagnéticos ~Antiferromagnéticos	MDs ~ (SP + SD); SP alto, ~ SP, ~ SD/PSD, SD/SSD ~ alto, SD ~ alto	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S > D ~ ΔHmt., ~ ΔH _{CR} Hmt ~ baja

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 9:
Anexos

Tabla 16.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de la región (2), Glacis de Buenavista, (GB).

Perfil BV Andosol	Composición magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
Ah	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Bajo neto. de minerales magnéticos, aumentan ~Cte., neto. para/diamagnéticos, ~Decrecen ferrimagnéticos ~Antiferrimagnéticos	SD ~ aumenta, SP ~ variable, PSD ~ aumenta, MD ~ aumenta, SD/SSD ~ decrece,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D
AB	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Bajo neto. minerales magnéticos, etc., ~Decrece neto. paramagnéticos, ~Aumenta neto. ferrimagnéticos ~Antiferrimagnéticos	SD ~ aumenta, SP ~ disminuye, SP/SD ~ PSD, SD/SSD ~ aumenta, SD ~ aumenta	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Mgh Hmt ~ aumenta Gth ~ decrece
Bw	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Aumenta neto. minerales magnéticos, ~Disminuye neto. paramagnéticos, ~Incrementa neto. ferrimagnéticos, ~Aumenta neto. antiferrimagnéticos	SD ~ decrece, SP ~ aumenta, SP/SD ~ SD/PSD, ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ ΔHmt ~ Mgt dura ~Mgh
Perfil AHLV Luvisol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
Ah	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Bajo neto. Minerales magnéticos ~Presencia de paramagnéticos, decrecen ~Bajo neto. de ferrimagnéticos ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), SP + MD, SP > MD, MD ~ disminuye, SD/SSD ~ bajo ~ SD	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ ΔHmt Mgt dura
Bt	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Bajo neto. Minerales magnéticos ~Neto. de paramagnéticos decrece ~Neto. de ferrimagnéticos variable ~Antiferrimagnéticos	MD s~ (SP + SD), ~ SP + MD, SP ~ disminuye ~ SP > MD, ~ PSD, SP/SD, SD/SSD ~ aumenta	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ (Gth + Hmt) ~ ΔGth Hmt ~ aumenta ~ Mgh

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética inferida a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se muestra: el perfil, la secuencia de horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética (segunda columna). Las características de los parámetros magnéticos de concentración (tercera columna) del tamaño de dominio magnético (cuarta columna), así como de la coercitividad ó dureza (quinta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para establecer variaciones en la concentración, distribución y composición del espectro de coercitvidades, p.ej., Gth y/ó Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)_{Ti}(titano magnetita con poco Ti) Mgt.(magnetita), Ti(Mgt)_{Ti}(titanomagnetita rica en Ti, magnetita), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh (Maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 9:
Anexos

Tabla 16.- (Continuación).

Perfil AHVT Vertisol	Composición magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
A ₁	Ti(Mgt) ₁ /Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Bajo neto. de minerales magnéticos, ~Paramagnéticos ~Neto. de ferrimagnéticos decrece ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), MD ~ alto, SP ~ escaso, SD/SSD ~ disminuye, ~ SD	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ Hmt alto ,disminuye ~ Mgh
A ₂	Ti(Mgt) ₁ /Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Aumento neto. de minerales magnéticos, ~Neto. paramagnéticos variable, ~Neto. ferrimagnéticos decrecen ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD); SD > SP, MD ~ alto, SP ~ bajo, cte., SD/SSD ~ decrece, SD ~ homogéneo	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hm t +Gth; ~ Mgh
AC	Ti(Mgt) ₁ /Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. de minerales magnéticos cte., ~Aumento neto. paramagnéticos ~Disminuye neto. ferrimagnéticos ~Antiferrimagnéticos	SD ~ aumenta, MD ~ alto, SP ~ escaso, ~ SP/SD, SD/SSD ~ decrece, SD ~aumenta	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt+Gth ~ ΔHmt Hmt ~ decrece
Perfil SUVT Vertisol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
AC ₁	Ti(Mgt) ₁ /Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Nto. Minerales magnéticos decrecen, ~Paramagnéticos, ~Neto. de ferrimagnéticos decrecen, ~Incremento neto. antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), SP ~ escaso, MD ~ alto, ~ SD/PSD, SD/SSD ~ alto, SD ~ alto	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Mgt dura
AC ₂	Ti(Mgt) ₁ /Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. minerales magnéticos decrecen, ~Bajo neto. paramagnéticos, ~Bajo neto. ferrimagnéticos, homogéneo ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SD + SP), MD ~ alto, SP ~ escaso, ~ PSD, SD ~ bajo	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ Hm t< Gth ~ Mgh

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 9:
Anexos

Tabla 17.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos de la región (3), volcán Nevado de Toluca, (VNT).

Perfil CR Regosol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
A	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Bajo neto. minerales magnéticos decrece, ~Aumento neto. paramagnéticos, ~Neto. ferrimagnéticos variable, decrecen ~Antiferrimagnéticos	MD ~ decrece, SD ~ aumenta, SP ~ escaso, ~ PSD, ~ SD/SSD, ~ SD	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Mgh
AC	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. minerales magnéticos variable, aumentan, ~Neto. paramagnéticos homogéneo, ~Aumento de ferrimagnéticos, ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), ~ MD, ~ SP/SD, ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Hmt > Gth ~ Mgt dura
C	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. minerales magnéticos variable, ~Neto. homogéneo de paramagnéticos, ~Aumento neto. ferrimagnéticos ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), ~ MD aumenta, ~ SD/PSD, SD/SSD ~ decrece, SD ~ decrece,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ Mgh
Perfil IGFIN Regosol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
A	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Decrece neto. minerales magnéticos, ~Incremento neto. paramagnéticos ~Bajo neto. de ferrimagnéticos ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), MD -alto, SP ~ escaso, ~ SD >SP, ~ SP/SD, ~ SD/SSD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Hmt > Gth ~ Mgh
AC	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. variable de minerales magnéticos, ~Decrece el neto de paramagnéticos, ~Neto. de ferrimagnéticos disminuye ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), ~ MD SP ~ escaso, ~ PSD, SD > SP, SD/SSD ~ decrecen, SD ~ decrece,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) S+D ~ Gth + Hmt ~ Hmt > Gth ~ Mgh
C	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Variable neto. minerales magnéticos, aumentan, ~Neto. paramagnéticos decrece ~Variable neto. ferrimagnéticos, aumentan, decrecen ~Antiferrimagnéticos	SD ~ aumenta, ~ MD, SP ~ escaso, ~ SP/SD, PSD, SD/SSD ~ aumenta,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Mgh

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética inferida a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se muestra: el perfil, la secuencia de horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética (segunda columna). Las características de los parámetros magnéticos de concentración (tercera columna) del tamaño de dominio magnético (cuarta columna), así como de la coercitividad ó dureza (quinta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para establecer variaciones en la concentración, distribución y composición del espectro de coercitvidades, p.ej., Gth y/ó Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)_{Ti}(titano magnetita con poco Ti) Mgt,(magnetita), Ti(Mgt)_{Ti}(titanomagnetita rica en Ti, magnetita), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh (Maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 9:
Anexos

Tabla 17.- (Continuación)

Perfil IGF2N Regosol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
A	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. variable de minerales magnéticos, ~Decrece neto. paramagnéticos, ~Neto variable de ferrimagnéticos, ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SD + SP), SD ~ decrece, SP ~ escaso, ~SD > SP, ~ MD, PSD, SD/SSD ~ aumentan, SD ~ aumenta,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Hmt > Gth ~ Mgt dura
AC	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Decrece neto. minerales magnéticos, ~Disminuye neto. de paramagnéticos, ~Homogéneo neto. de ferrimagnéticos, ~Aumento de antiferrimagnéticos	MD s~ (SP+ SD); MD > SD, MD ~ aumenta, SP ~ escasos, ~ SP/SD, SD/SSD ~ decrece, SD ~ decrece,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Mgt dura ~ Mgh
C	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Aumento neto. de minerales magnéticos, ~ Paramagnéticos, ~ incremento neto. Ferrimagnéticos, ~ Antiferrimagnéticos	~ SD, ~ MD, SP ~ escaso, ~SP/SD, SD/SSD ~ decrece, SD ~ aumenta,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Mgt dura ~ Mgh
Perfil IGF1D Regosol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
A	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Aumenta neto. de minerales magnéticos, ~Neto. variable de paramagnéticos, ~Incremento de neto. paramagnéticos, ~Neto. de antiferrimagnéticos decrece	~ (MD + SP); MD > SP, MD ~ alto, SP ~ escaso, SD ~ decrece ~ MD, PSD, SD/SSD ~ decrece, SD ~ decrece,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ □Hmt ~ Hmt > Gth ~ Mgt dura
AC	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Decrece neto. minerales magnéticos, ~Disminuye neto. paramagnéticos, ~Variable neto. ferrimagnéticos, ~Antiferrimagnéticos	SD ~ aumenta, ~ MD, ~ PSD, MD, ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Hmt < Gth ~ Mgh
C	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Incremento de neto. minerales magnéticos, ~aumenta neto. paramagnéticos, ~alto neto. de ferrimagnéticos, ~Antiferrimagnéticos	SD ~ decrece, MDs ~ (SP + SD), SP ~ escaso, MD ~ alto, SD/SSD ~ aumenta, ~ SD	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ Hmt > Gth

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 9:
Anexos

Tabla 17.- (Continuación)

Perfil IGF2D Regosol	Composición Magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
A	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Aumenta contenido de minerales magnéticos, ~incremento de neto. paramagnéticos, ~aumento neto. ferrimagnéticos, ~decrece contenido de antiferrimagnéticos,	MDs ~ (SP + SD); SD > SP, SP ~ escaso, (MD + SP); MD > SP, ~ PSD, MD, ~ SD/SSD, SD ~ aumenta,	~ Mezclas de coercitividades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ Hmt > Gth ~ Mgh ~ Mgt dura
AC	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~decrece neto. minerales magnéticos, ~incremento de neto., paramagnéticos, ~decrece neto. de ferrimagnéticos, ~Antiferrimagnéticos	SD ~ variable, (SP + MD); MD > SP, SP ~ escaso, ~ PSD, MD, ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitividades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ □ Hmt ~ Hmt < Gth ~ Mgh
C	Ti(Mgt) _{Ti} /Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ decrece neto minerales magnéticos, ~ neto de paramagnéticos aumenta, ~ Aumenta neto de ferrimagnéticos, ~ Antiferrimagnéticos	SD ~ decrece, MDs ~ (SP+SD); SD > SP, ~ (MD+SP); MD > SP, SP ~ escaso, ~ MD, SP/SD, ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitividades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ □ Hmt ~ Hmt < Gth ~ Mgt dura ~ Mgh

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 9:
Anexos

Tabla 18.- Síntesis esquemática de la interpretación de los perfiles magnéticos con aumento magnético superficial.

Perfil CGN Cambisol	Composición magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
Ap	Ti(Mgt _· Ti)/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo neto, minerales magnéticos ~ Alto neto, dia/paramagnéticos ~ Constante, alto neto, ferrimagnéticos	~ MDs - (SP + SD), ~ (MD + SP), ~ SP ~ SD/PSD, ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitividades ~ (Suaves + Duros)
Ah	Ti(Mgt _· Ti)/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo neto, minerales magnéticos ~ Bajo neto, dia/paramagnéticos ~ Decremento de ferrimagnéticos	~ MDs-(SP + SD), ~ (MD+SP), SP ~ aumenta ~ PSD, ~ MD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitividades ~ (Suaves + Duros) ~ D < S ~ ΔHm
AB	Ti(Mgt _· Ti)/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo neto, minerales magnéticos ~ Aumento neto, dia/paramagnéticos ~ Decremento de ferrimagnéticos ~ Incremento de Antiferromagnéticos	~ SD, ~ (SP + MD), SP ~ decrece ~ PSD, ~ MD,	~ Mezclas de coercitividades ~ (Suaves + Duros) ~ D > S ~ Hm < Gth
BC	Ti(Mgt _· Ti)/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Alto neto, minerales magnéticos ~ Cte. neto, dia/paramagnéticos ~ Incremento de ferrimagnéticos ~ Antiferromagnéticos	~ SD, ~ MD, SP ~ decrece ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitividades ~ (Suaves + Duros) ~ D > S ~ Hm > Gth
Perfil OTM Fluvisol	Composición magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
Ap	Ti(Mgt _· Ti)/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo neto, minerales magnéticos, ~ Alto neto, para/diamagnéticos, ~ Alto neto ferrimagnéticos ~ Antiferromagnéticos	~ MD, ~ SD, SP ~ variable, ~ SP-SP/SD, ~ SD/SSD,	~ Mezclas de coercitividades ~ (Suaves + Duros) ~ S > D ~ ΔHm, ~ ΔH _{CR} Hmt ~ baja
AB	Ti(Mgt _· Ti)/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~ Bajo y variable neto, minerales magnéticos, ~ Bajo neto, paramagnéticos, etc., ~ Aumenta neto., ferrimagnéticos ~ Antiferromagnéticos	MDs ~ (SP + SD); SP alto, ~ SP, ~ SD/PSD, SD/SSD ~ alto, SD ~ alto	~ Mezclas de coercitividades ~ (Suaves + Duros) ~ S > D ~ ΔHmt., ~ ΔH _{CR} Hmt ~ baja

La tabla muestra la composición y características de la mineralogía magnética inferida a partir del análisis de los parámetros magnéticos estudiados. De izquierda a derecha de la tabla se muestra: el perfil, la secuencia de horizontes que lo integran y su evolución (primera columna). La composición de la mineralogía magnética (segunda columna). Las características de los parámetros magnéticos de concentración (tercera columna) del tamaño de dominio magnético (cuarta columna), así como de la coercitividad ó dureza (quinta columna), respectivamente. Los cambios en los parámetros de dureza se utilizan para establecer variaciones en la concentración, distribución y composición del espectro de coercitividades, p.ej., Gth y/ó Hmt, Mgh. La simbología representa Ti(Mgt)_·Ti(titano magnetita con poco Ti) Mgt,(magnetita), Ti(Mgt)_·Ti(titanomagnetita rica en Ti, magnetita), Ti(Mgh) (titanomaghemita), Mgh (Maghemita), Hmt (Hematita), Gth (Goethita).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 9:
Anexos

Tabla 18.- (Continuación)

Perfil AHVT Vertisol	Composición magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
A ₁	Ti(Mgt)-Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Bajo neto. de minerales magnéticos, ~Paramagnéticos ~Neto. de ferrimagnéticos decrece ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), MD ~ alto, SP ~ escaso, SD/SSD ~ disminuye, ~ SD	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ Hmt alto ,disminuye ~ Mgh
A ₂	Ti(Mgt)-Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Aumento neto. de minerales magnéticos, ~Neto. paramagnéticos variable, ~Neto. ferrimagnéticos decrecen ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD); SD > SP, MD ~ alto, SP ~ bajo, cte., SD/SSD ~ decrece, SD ~ homogéneo	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth; ~ Mgh
AC	Ti(Mgt)-Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. de minerales magnéticos cte., ~Aumento neto. paramagnéticos ~Disminuye neto. ferrimagnéticos ~Antiferrimagnéticos	SD ~ aumenta, MD ~ alto, SP ~ escaso, ~ SP/SD, SD/SSD ~ decrece, SD ~aumenta	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt+Gth ~ ΔHmt Hmt ~ decrece
Perfil SUVT Vertisol	Composición magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
AC ₁	Ti(Mgt)-Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Nto. Minerales magnéticos decrecen, ~Paramagnéticos, ~Neto. de ferrimagnéticos decrecen, ~Incremento neto. antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), SP ~ escaso, MD ~ alto, ~ SD/PSD, SD/SSD ~ alto, SD ~ alto	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Mgt dura
AC ₂	Ti(Mgt)-Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. minerales magnéticos decrecen, ~Bajo neto. paramagnéticos, ~Bajo neto. ferrimagnéticos, homogéneo ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SD + SP), MD ~ alto, SP ~ escaso, ~ PSD, SD ~ bajo	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ Hmt < Gth ~ Mgh
Perfil CR Regosol	Composición magnética	Concentración magnética	Dominio magnético	Dureza magnética
A	Ti(Mgt)-Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Bajo neto. minerales magnéticos decrece, ~Aumento neto. paramagnéticos, ~Neto. ferrimagnéticos variable, decrecen ~Antiferrimagnéticos	MD ~ decrece, SD ~ aumenta, SP ~ escaso, ~ PSD, ~ SD/SSD, ~ SD	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Gth + Hmt ~ Mgh
AC	Ti(Mgt)-Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. minerales magnéticos variable, aumentan, ~Neto. paramagnéticos homogéneo, ~Aumento de ferrimagnéticos, ~Antiferrimagnéticos	MDs ~ (SP + SD), ~ MD, ~ SP/SD, ~ SD/SSD, ~ SD,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S +D ~ Gth + Hmt ~ Hmt > Gth ~ Mgt dura
C	Ti(Mgt)-Ti/Mgt Ti(Mgh)/Mgh Hmt Gth	~Neto. minerales magnéticos variable, ~Neto. homogéneo de paramagnéticos, ~Aumento neto. ferrimagnéticos ~Antiferrimagnéticos ~	MDs ~ (SP + SD), ~ MD aumenta, ~ SD/PSD, SD/SSD ~ decrece, SD ~ decrece,	~ Mezclas de coercitvidades ~ (Suaves + Duros) ~ S + D ~ Hmt + Gth ~ Mgh

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 9:
Anexos

Tabla 19.- Esquema sinóptico de la pedogénesis magnética.

Parámetros	Incipiente (R-F)	Moderada (C-A-V)	Avanzada (C-L)	Realce (R-F-C-V)
χ vs $\chi_{fd\%}$	$R < \chi < F$ $F < \chi_{fd\%} < R$	$V < \chi < C \sim A$ $V < \chi_{fd\%} < C \sim A$	$L < \chi < C$ $C < \chi_{fd\%} < L$	$V < R < F < \chi < V < C$ $R < V < \chi_{fd\%} < C < F$
$SIRM_{1T}/\chi$ vs H_{CR}	$F < SIRM_{1T}/\chi < R$ $F < H_{CR} < R$	$V < A < SIRM_{1T}/\chi < C$ $C \sim V < SIRM_{1T}/\chi < A$	$L < \chi < C$ $L < SIRM_{1T}/\chi < C$	$V < F < SIRM_{1T}/\chi < C < R$ $F < H_{CR} < R \sim F \sim C$
χ vs $SIRM_{1T}$	$F < \chi < R$ $F < SIRM_{1T} < R$	$V < A < \chi < C$ $V < A < SIRM_{1T} < C$	$L < \chi < C$ $L < SIRM_{1T} < C$	$V < R < \chi < F < C \sim V$ $V < F < C < R$
$HIRM_{300}$ vs S_{300}	$F < HIRM_{300} < R$ $F < S_{300} < R$	$V < C < HIRM_{300} < A$ $V < C < S_{300} < A$	$C < HIRM_{300} < L$ $L < S_{300} < C$	$V < F < HIRM_{300} < C < R \sim V$ $V < F < S_{300} < R \sim C$
S_{100} vs S_{300}	$R < S_{100} < F$ $F < S_{300} < R$	$V < C < S_{100} < A$ $V < C < S_{300} < A$	$L < S_{300} < C$ $L < S_{300} < C$	$V < R < S_{100} < F < C$ $V < F < S_{300} < R \sim C$
ARM/IRM_{100} vs $\chi_{fd\%}$	$R < ARM/IRM_{100} < F$ $F < \chi_{fd\%} < R$	$V < C < ARM/IRM_{100}$ $< A$ $V < C < \chi_{fd\%} < A$	$C < ARM/IRM_{100} < L$ $C < \chi_{fd\%} < L$	$R < V < ARM/IRM_{100} < C < F$ $R < V < \chi_{fd\%} < C < F$
TMA	$R < T < F$	$C < V < T < A$	$C < T < L$	$R < C < t < F < V$
PMA	$F < PP < R$	$C < V < PP < A$	$C < PP < L$	$F < C < PP < R$
CV	$F < CV < R$	$C < V < CV < A$	$C \sim CV \sim L$	$F \sim C < V \sim R$

La tabla muestra la representación esquemática de la relación entre algunos de los parámetros magnéticos más representativos analizados en este documento y su relación con el grado evolutivo de cada perfil así como la influencia de algunas variables ambientales de cada localidad. De izquierda a derecha: Relación entre parámetros magnéticos, en etapa incipiente, moderada, avanzada así como la firma magnética de cada perfil. Regosol (R), Fluvisol (F), Cambisol (C), Andosol (A), Vertisol (V), Luvisol (L), Calcisol (C). Valores promedio de temperatura (TMA) y precipitación (PP) media anual, y cubierta vegetal (CV) respectivamente.



Mineralogía magnética de suelos volcánicos en una toposecuencia del valle de Teotihuacán

Jorge F. Rivas Ortiz^{1,*}, Beatriz Ortega Guerrero², Elizabeth Solleiro Rebolledo³,
Sergey Sedov³, Serafín Sánchez Pérez⁴

¹ Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F., México

² Instituto de Geofísica, Departamento de Geomagnetismo y Exploración, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F., México

³ Instituto de Geología, Departamento de Edafología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510, México D.F., México

⁴ Instituto de Geología, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, México D.F., México

* jorger@geofisica.unam.mx

Resumen

Numerosos trabajos han demostrado la relación existente entre la mineralogía magnética de suelos y paleosuelos y las variaciones climáticas y ambientales, o el efecto de la contaminación en los mismos. Con el propósito de analizar esta relación en una toposecuencia del valle de Teotihuacán, se llevó a cabo un estudio de las propiedades magnéticas en cinco suelos y un paleosuelo desarrollados en depósitos volcanoclásticos distribuidos en diferentes posiciones del relieve entre 2250 y 3060 msnm, que incluyen: dos Cambisoles, un Calcisol, dos Fluvisoles y un Vertisol. La mineralogía magnética fue caracterizada a través de técnicas de magnetismo de rocas que determinan la composición, concentración y distribución de tamaños de dominio de los minerales magnéticos, y esta caracterización fue comparada y validada con parámetros no magnéticos. Los resultados de la investigación muestran que existe una marcada diferenciación de las propiedades magnéticas en función de las condiciones ambientales de cada suelo y su grado de pedogénesis. Las características magnéticas varían entre dos extremos: 1) los Cambisoles contienen mayor concentración de minerales magnéticos de mayor tamaño; y 2) los Fluvisoles presentan bajas concentraciones de minerales magnéticos dominados por partículas finas. El Calcisol presenta variaciones entre estos dos extremos, tanto en la concentración de minerales magnéticos como en su tamaño, mientras que el Vertisol presenta baja concentración y tamaños gruesos. A diferencia de lo que sucede en las secuencias de loess-paleosuelos que registran un aumento en susceptibilidad magnética (χ) en la parte superficial, originado por un incremento de minerales ferrimagnéticos y antiferrimagnéticos de tamaño fino DS y SP, los reales observados en un Cambisol y un Fluvisol de Teotihuacán se deben a la incorporación de nuevos materiales de origen volcánico y fluvial en la superficie. Por el contrario, las mayores concentraciones de partículas SP y DS ocurren en general en los horizontes inferiores. En ellos es débil aún la formación de minerales magnéticos pedogénicos, tanto ferrimagnéticos como antiferrimagnéticos. La baja magnetización intrínseca de estos últimos y la proporción relativamente baja en la que se presentan ocasionan que sea difícil su detección, ya que quedan enmascarados por las fases ferrimagnéticas. Nuestros análisis muestran las particularidades de suelos desarrollados en materiales volcánicos y el potencial de los estudios de propiedades magnéticas en combinación con otros indicadores pedogenéticos en las reconstrucciones de las condiciones ambientales en el pasado.

Palabras clave: mineralogía magnética, suelos volcánicos, toposecuencia, valle de Teotihuacán.

Abstract

Numerous studies have demonstrated the relationship between magnetic mineralogy in soil and paleosol sequences and climatic and environmental variations as well as pollution effects affecting them. In order to analyze this relationship, we carried out a study of magnetic properties in five soils and a paleosol, all developed on volcanoclastic deposits and located throughout an altitudinal range of 2250 to 3040 m above sea level and within a toposequence from Teotihuacan valley. These soil profiles consist of two Cambisols, a Calcisol, two Fluvisols, as well as a Vertisol. The magnetic mineralogy was characterized by rock magnetism techniques in order to determine the composition, concentration and domain size distribution of magnetic minerals, and was compared and validated with other non-magnetic parameters. Results reflect a clear difference in magnetic properties which are influenced by environmental conditions for each soil and their degree of pedogenesis. These magnetic properties vary between two extremes: 1) Cambisols, with higher concentrations of magnetic minerals of larger particle size; and 2) Fluvisols with low concentrations of magnetic minerals dominated by fine particle size. The analyzed Calcisol presents variations between these two extremes, for both aspects (concentration and grain sizes), while the Vertisol shows low concentration and coarse sizes. Unlike magnetic susceptibility enhancement reported in loess-paleosol sequences, which is caused by a rise of SD and SP ferri- and antiferrimagnetic minerals, the increase reflected in a Cambisol and Fluvisol from Teotihuacan is caused by the incorporation of new volcanic and fluvial material to the upper part of the soils. By contrast, the higher SP and SD concentrations are located in the lower horizons. These present a rather weak formation of pedogenic magnetic minerals, both ferrimagnetic and antiferrimagnetic. The low intrinsic magnetization of the latter and the relatively low proportion in which they occur make identification difficult because they are masked by ferrimagnetic phases. Our analysis highlights the features of soils developed on volcanic material as well as the potential that the analysis of magnetic properties holds in combination with other pedogenetic indicators for the reconstruction of past environmental conditions.

Keywords: magnetic mineralogy, volcanic soils, toposequence, Teotihuacan valley.

1. Introducción

Numerosos trabajos han tratado de establecer las relaciones entre las variaciones climáticas ocurridas durante el Cuaternario y la mineralogía magnética de suelos y paleosuelos de diversas localidades en el mundo. Estos estudios han sido particularmente prometedores en las secuencias de loess-paleosuelos de China (Liu *et al.*, 2007, Lu *et al.*, 2008), Europa (Oaches y Banerjee, 1996; Jordanova *et al.*, 2003, 2004; Liu *et al.*, 2010), Argentina (Orgeira *et al.*, 2003; Bidegain *et al.*, 2009) y el noroeste de Estados Unidos (Geiss *et al.*, 2008). En otros trabajos se ha establecido la relación entre la mineralogía magnética de suelos y cambios ambientales (Grimley *et al.*, 2004; Geiss y Zanner, 2006, 2007) y contaminación (Chaparro, 2006; Orgeira *et al.*, 2008), entre otros. Muchos estudios de este tipo se basan únicamente en la susceptibilidad magnética (χ) como indicador (o proxy) de las variaciones climáticas y ambientales. Sin embargo, ya que este parámetro depende no sólo de la concentración de partículas ferrimagnéticas, sino también de la presencia de un amplio rango de minerales magnéticos y de sus distribuciones de tamaño (Geiss y Zanner, 2006), la interpretación de la χ rara vez es única y directa, por lo que las interpretaciones pueden verse comprometidas si no se han caracterizado adecuadamente los componentes magnéticos. Por ello, los análisis de magnetismo de rocas deben involucrar técnicas que determinen la composición, concentración y distribución de tamaños de dominio de los minerales magnéticos, y frecuentemente requieren de información adicional de

otros parámetros no magnéticos para lograr una acertada interpretación paleoambiental.

Gran parte de las secuencias de loess-paleosuelos se caracterizan por registrar un aumento en χ en la parte superficial del suelo. Este aumento se debe mayormente a un incremento de minerales ferrimagnéticos (magnetita y/o maghemita) de tamaño ultrafino superparamagnético (SP, $< 0.01 \mu\text{m}$) a dominio sencillo (DS, $< 0.1 \mu\text{m}$; p.ej. Maher, 1986; Heller y Evans, 1995; Hunt *et al.*, 1995), pero también al incremento de partículas tanto ferrimagnéticas como antiferrimagnéticas (hematita o goethita) (Geiss *et al.*, 2004). El origen de dicho incremento se ha interpretado de diferentes maneras, entre ellas la ocurrencia de incendios, fermentación, calentamiento, actividad biológica (Tite y Lington, 1975; Mullins, 1977; Maher, 1986; Thompson y Oldfield, 1986), la contaminación del suelo (Chaparro, 2006) y la transformación de minerales paramagnéticos o antiferrimagnéticos a fases ferrimagnéticas (Geiss y Zanner, 2007).

Este incremento en χ ha sido utilizado para reconstruir las condiciones paleoclimáticas durante la formación de los suelos (Verosub *et al.*, 1993, entre otros). A partir de las primeras observaciones hechas para definir la influencia del clima, particularmente la precipitación, en la concentración y el tipo de minerales magnéticos (Maher *et al.*, 1994; Han *et al.*, 1996; Maher, 1998), se generó una controversia sobre el efecto real de la precipitación en la formación de los minerales magnéticos pedogenéticos. Porter *et al.* (2001) señalan que el efecto de la lluvia en la señal magnética sólo es responsable del 10 al 11 % de la

varianza de la susceptibilidad magnética en suelos loésicos. Sin embargo, Maher *et al.* (2002), en un estudio detallado en las estepas rusas, establecen que la precipitación tiene un papel fundamental en la distribución de los minerales magnéticos del suelo. Por otra parte, Bartel *et al.* (2011) encuentran en suelos loésicos de la región sur de las pampas argentinas una diferenciación en las propiedades magnéticas de acuerdo a su grado de evolución y gradiente de humedad.

En numerosos suelos y paleosuelos volcánicos o loésicos con contribución de minerales volcánicos el comportamiento que se ha observado es opuesto a lo encontrado en las secuencias de loess de China y Rusia, ya que no presentan el aumento en χ en la parte superficial (Orgeira *et al.*, 1998; Vásquez *et al.*, 1998; Rivas-Ortiz, 2003; Schellenberger *et al.*, 2003; Ortega-Guerrero *et al.*, 2004; Rivas-Ortiz, 2006; Rivas-Ortiz *et al.*, 2006; entre otros). Sin embargo, en ellos también se reconoce que la pedogénesis es responsable de tal comportamiento. Ortega-Guerrero y colaboradores (2004) establecen que la ausencia del realce magnético se debe a un balance negativo entre los procesos pedogénicos que son los responsables de la formación de una mineralogía magnética ultrafina y las condiciones reductomórficas bajo climas húmedos que resultan en la destrucción de los mismos. De hecho, el hidromorfismo en los suelos causa una disminución en χ (Nawrocki *et al.*, 1996; Terhorst *et al.*, 2001; Grimley y Vepraskas, 2000; Grimley *et al.*, 2004). Por otra parte, la composición del material parental tiene un papel fundamental en la ausencia del aumento de susceptibilidad magnética, ya que la abundancia de minerales ferrimagnéticos en depósitos volcanoclásticos básicos e intermedios es tal que la pedogénesis no compensa de manera eficiente la pérdida de los minerales primarios.

Con el propósito de establecer la relación entre la mineralogía magnética y el clima, se analizan las propiedades magnéticas en una toposecuencia compuesta por cinco perfiles de suelos volcánicos modernos y un paleosuelo en el valle de Teotihuacán. Este estudio contribuye al desarrollo de una función de transferencia que pueda ser aplicada a los paleosuelos volcánicos con el objetivo de establecer un modelo de variabilidad climática en el centro de México y las condiciones ambientales bajo las que se desarrollan los suelos de esta región.

2. Área de estudio

El valle de Teotihuacán se localiza en la porción centro-oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano dentro de la cuenca de México (Figura 1). Su altitud oscila entre 2250 y 3060 msnm. Geomorfológicamente, el valle se caracteriza por presentar una extensa altiplanicie escalonada así como por la presencia de volcanes aislados (Lugo Hubp, 1984). Las rocas volcánicas más antiguas en la región son andesitas y dacitas del Plioceno temprano y basaltos del Plioceno tardío, que afloran en el cerro Patlachique (Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera, 1989) y el cerro

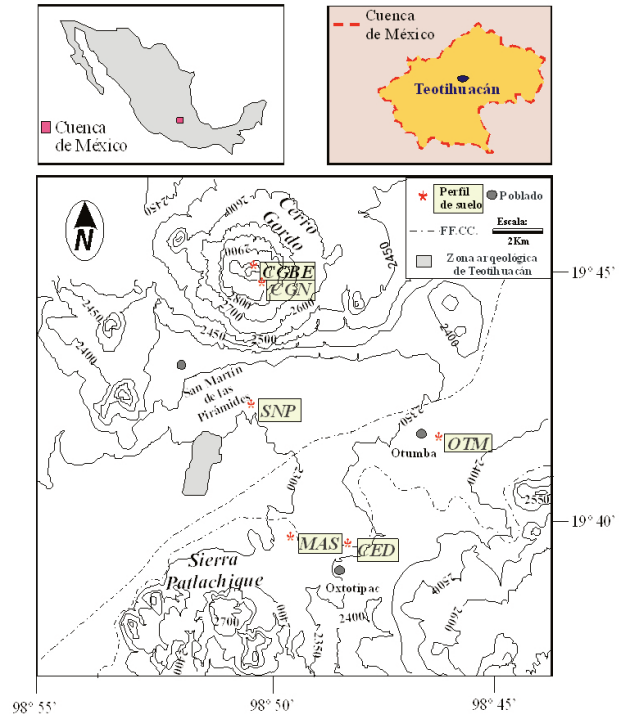


Figura 1. Localización de los seis suelos volcánicos que se estudiaron dentro de la región del valle de Teotihuacán. Los perfiles CGBE y CGN son Cambisoles, MAS es un Calcisol, los perfiles SNP y OTM son Fluvisoles y el perfil CED es un Vertisol.

Gordo (García-Palomo *et al.*, 2002).

Los suelos del valle son de tipo Fluvisol, Feozem, Cambisol, Leptosol y Vertisol (INEGI, 1999). La orografía afecta a la precipitación, lo que da lugar a climas que varían de semisecos a subhúmedos, registrándose una precipitación anual de 563.3 mm y una temperatura media anual de 14.9 °C (García, 1968, 1988). De acuerdo a las estimaciones de Castilla y Tejero (1983), el clima de Teotihuacán varía en función de la altitud, de manera que en las posiciones más elevadas, en el cerro Gordo, la precipitación anual es de 800 mm con una temperatura media anual de 12 °C, como consecuencia de la sombra parcial y la dirección de los vientos, sobre todo en la ladera norte (McClung de Tapia *et al.*, 2003).

Los suelos analizados en esta investigación han sido estudiados previamente por otros autores en estudios paleoambientales mediante diversas técnicas (Cabadas-Báez, 2004, 2007; Gama-Castro *et al.*, 2005a, 2005b; Lounejeva Baturina *et al.*, 2007a, 2007b; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2006, 2011), y en estudios geoarqueológicos (McClung de Tapia *et al.*, 2003, 2005; Rivera-Uria *et al.*, 2007; Rivera-Uria, 2008). Se seleccionaron seis perfiles distribuidos a lo largo de una toposecuencia de aproximadamente 10 km, con dirección NW-SE (Figura 2, Tabla 1). La clasificación de los suelos fue establecida con base en los criterios de la WRB (2006) y tomada de los trabajos previos (McClung de Tapia *et al.*, 2003; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2006; Rivera-

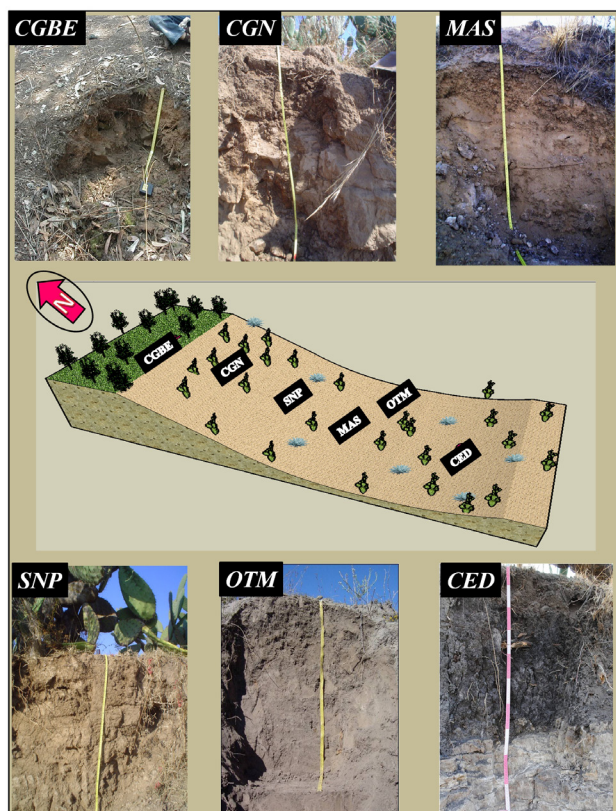


Figura 2. Representación esquemática de la ubicación de los perfiles de suelo estudiados dentro de la toposecuencia.

Uriá *et al.*, 2007). Los perfiles de suelos estudiados son: cerro Gordo (CGBE y CGN), ubicados en las posiciones de mayor altitud (Tabla 1); Maseca (MAS), en el talud inferior, en la transición entre el cerro y el valle; San Pablo (SNP) y Otumba (OTM), en las posiciones más bajas, representando los perfiles del fondo del valle. Adicionalmente, se analizó un perfil denominado Cedazo (CED), el cual contiene un paleosuelo de color oscuro, que se correlaciona con un paleosuelo sepultado en San Pablo. En esta localidad, este último se encuentra a una profundidad de 1.25 m, separado de SNP por sedimentos y pedosedimentos aluviales (Rivera-Uría *et al.*, 2007; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2011).

2.1 Descripción de los perfiles

A continuación se presenta, de acuerdo a su posición en la toposecuencia, una breve descripción de los perfiles analizados. Las edades de los suelos se estiman de acuerdo con los fechamientos de ^{14}C publicados en trabajos previos y se presentan como edades calibradas antes del presente (cal AP). En todos los perfiles el material parental consiste en depósitos volcanosedimentarios de composición andesítica-basáltica. Cabadas-Báez (2004) reporta en CGN, MAS y OTM una asociación predominante de plagioclasas intermedias (50-62 %), ferromagnesianos (20-30 %) y cuarzo (5-10 %), que coinciden con las observaciones de Rivera-Uría (2008) en SNP.

Tabla 1. Localización de los perfiles estudiados dentro del valle y algunas de sus características ambientales.

Localidad/ Perfil	Ubicación		Edad (años cal AP)	Clasificación (WRB, 2006)	Vegetación	Drenaje	Pendiente	Precipitación anual (mm)	Temperatura media anual (°C)
	Coordenadas	Horizontes							
Cerro Gordo CGBE	19°45'5.4"	Ah ₁ -Ah ₂ -B	--	Cambisol	Bosque de encino	Bueno	8°	800	12
	98°49'6.4" 3040 m								
Cerro Gordo CGN	19°44'55"	Ap-Ah-AB-BC	6054 ± 99 ¹	Cambisol	Cultivo de <i>Opuntia</i>	Moderado	8.5°	750	12
	98°49'23" 2948 m								
Maseca MAS	19°39'36.8"	Ap-Bk-C	< 13358 ± 140 ²	Calcisol	Estrato herbáceo de gramíneas	Bueno	2.4°	604	16
	98°49'19.4" 2315 m								
San Pablo SNP	19°42'30.9"	Ap-C	< 520 ³	Fluvisol	Cultivo de <i>Opuntia</i>	Bueno	1°	608	15
	98° 9'15.2" 2317 m								
Otumba OTM	19°41'24.5"	Ap-AB	< 3044 ± 93 ⁴	Fluvisol	Cultivo de <i>Opuntia</i>	Moderado	2.5°	514.3	14.8
	98°45'48.1" 2371 m								
Cedazo CED	19°38'32.6"	Ap-Ah ₁ -Ah ₂	3166 ± 69 ⁵	Vertisol	Cultivo de <i>Zea mays</i>	Bueno	7°	604	16
	98°48'14.1" 2353 m								

¹ McClung *et al.* (2003); ² McClung *et al.* (2005); ³ Rivera-Uría *et al.*, 2007

2.1.1. Cima del cerro Gordo (CGBE)

Se ubica en la cima del cerro Gordo bajo un bosque de encino y con buen drenaje. Su espesor es de 0.30 m y presenta una secuencia de horizontes Ah₁-Ah₂-Bw, clasificado como un Cambisol (Figura 2, Tabla 1). El horizonte Ah (Ah₁ y Ah₂) tiene un color pardo oscuro, así como una densidad de raíces de media a alta, lo que se refleja en su alto contenido de carbono orgánico (5.5 %). Su textura es limosa, aunque en Bw se registra un incremento de arcilla y un cambio de coloración, hacia tonos amarillentos (Tabla 2). El límite entre los subhorizontes es irregular y difuso, con una transición gradual. No se tienen datos de su edad.

2.1.2. Ladera del cerro Gordo (CGN)

Se localiza sobre una ladera en el flanco sur del cerro Gordo, en una posición inestable en la cual el bosque de encino ha sido reemplazado por cultivo de *Opuntia*; presenta drenaje moderado (Figura 2, Tabla 1). El perfil tiene un espesor de 0.71 m, presenta una secuencia de horizontes Ap-Ah-AB-BC y ha sido clasificado como un Cambisol. Anteriormente, Solleiro-Rebolledo *et al.* (2006) lo clasificaron como un Feozem, aunque en realidad no presenta horizontes de diagnóstico y el horizonte superficial no es mólico. Es un suelo de desarrollo moderado, limoso, aunque con proporciones mayores de arcilla que CGBE (Tabla 2). Es notorio el cambio de color entre el horizonte Ap y el Ah, lo cual se atribuye al uso de suelo, deforestación

y cultivación, (Cabadas-Báez, 2004), aunque se observa que el porcentaje de carbono orgánico es igual en ambos horizontes (1.6 %, Tabla 2). Un índice del grado de pedogénesis lo brinda la relación Feo/Fed (el cociente entre el hierro extraído con oxalato que evidencia el contenido de hierro amorfo y el hierro extraído con ditionito que indica la presencia de hierro cristalino), de tal forma que entre más pequeño sea este cociente, se refleja una mayor contribución de los minerales de alta cristalinidad. En esta relación, los horizontes BC y Ap tienen una mayor proporción de óxidos de hierro amorfo, mientras que en los horizontes Ah y AB es mayor el contenido de hierro cristalino (Tabla 2). De acuerdo con McClung de Tapia *et al.* (2003), el paleosuelo que subyace directamente al suelo moderno tiene una edad de 6054 años cal AP, que sugiere la edad máxima del suelo moderno.

2.1.3. Maseca (MAS)

Ubicado en la parte baja de la sierra Patlachique en una posición estable del valle y con un buen drenaje. Su espesor es de 1.20 m, donde fueron distinguidos los siguientes horizontes: Ap, Bk, C; ha sido clasificado como un Calcisol (Figura 2, Tabla 1). El horizonte Ap es de color pardo oscuro y contiene abundantes restos de cerámica, pequeños y desgastados, mostrando un uso intensivo desde la época teotihuacana (periodo Clásico, 200-600 D.C.; Cabadas-Báez, 2004). En el horizonte Bk, el color cambia a pardo amarillento. El suelo tiene una moderada proporción de

Tabla 2. Propiedades selectas de los suelos que conforman la toposecuencia.

Perfil	Horizonte	Color Húmedo *	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	pH	C.O. (%)	Fed (%)	Feo (%)	Feo/Fed	Ref.
CGBE	Ah ₁	7.5YR3/3	25.5	61.3	13.2	6	5.5	nd	nd	nd	1
	Ah ₂	7.5YR3/3	27.5	55.3	17.3	6	2.4	nd	nd	nd	1
	Bw	7.5YR3/3	27.2	49.6	23.2	6	1.7	nd	nd	nd	1
CGN	Ap	10YR4/3	50.08	35.56	15.36	7	1.6	0.11	0.1	0.91	2
	Ah	7.5YR4/3	23.92	44.67	32.03	7	1.6	0.13	0.03	0.23	2
	AB	10YR2/2	15.57	54.75	29.68	7	1	0.14	0.04	0.29	2
	BC	10YR3/3	18.3	46.32	33.36	7	0.5	0.13	0.03	0.91	2
MAS	Ap	10YR3/3	37.98	36.1	25.92	8	0.8	0.3	0.2	0.67	2
	Bk	10YR3/3	34.47	32.79	32.74	8	0.6	0.45	0.15	0.33	2
	C	10YR3/3	24.39	48.69	26.92	8	0.4	0.35	0.13	0.37	2
SNP	Ap	10YR3/3	46.8	28.2	24.9	8	1	0.47	0.01	0.02	3
	C	10YR3/3	36.2	26.9	36.9	8	0.8	0.41	0.01	0.02	3
OTM	Ap	10YR2/2	35.94	35.86	28.2	7	1.3	0.64	0.4	0.62	2
	AB	10YR2/2	24.78	43.2	32.02	7	1.5	0.94	0.73	0.77	2
CED	Ah ₁	10YR4/1	14.6	29.2	56.2	nd	0.8	nd	nd	nd	1
	Ah ₂	10YR4/1	15.9	34.6	49.5	nd	1.1	nd	nd	nd	1

*Color de acuerdo a las tablas Munsell (2000)

CO = carbono orgánico; Fed = hierro extraído con oxalato-citrato-bicarbonato; Feo = hierro extraído con oxalato ácido; nd = no determinado

Ref = Referencias: ¹Este trabajo; ²Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2006; ³Rivera Uria *et al.*, 2007;

arcilla, siendo el horizonte Bk el que registra el máximo (32.7 %), lo que, dada la menor proporción que posee el horizonte C (26.9 %), demuestra que fue formada por pedogénesis. Los valores de Feo y Fed son similares, pero el cociente Feo/Fed (Tabla 2) sugiere que es el horizonte Ap el que muestra menor intemperismo. Un rasgo que caracteriza al suelo son las acumulaciones de carbonato de calcio que rellenan fisuras, poros y biporos (Cabadas-Báez, 2004). El paleosuelo que subyace al suelo moderno tiene una edad de 13358 años cal AP, lo que indica la edad máxima del Calcisol (McClung de Tapia *et al.*, 2005).

2.1.4. San Pablo (SNP)

También se ubica en una posición con buen drenaje en la parte baja del valle; tiene un espesor de 0.30 m y una secuencia de horizontes Ap-C, y se ha clasificado como un Fluvisol con un desarrollo incipiente (Figura 2, Tabla 1). Sin embargo, muestra una alta cantidad de arcilla y valores muy bajos de Feo/Fed (Tabla 2), lo que, en principio, se asocia con una mayor pedogénesis. Al analizar sus propiedades morfológicas, se observa que tiene una estructura pobremente desarrollada, muy friable y el horizonte C aún conserva laminaciones, denotando su carácter aluvial (Rivera-Uria, 2008). Solleiro-Rebolledo *et al.* (2011) obtuvieron una edad de 520 años cal AP en un pedosedimento que subyace el Fluvisol, por lo que cabe suponer que el suelo SNP tiene una edad menor.

2.1.5. Otumba (OTM)

Se ubica en la parte baja del valle, en una posición geomórfica similar al de SNP, tiene un espesor de 0.7 m y una secuencia de horizontes Ap-AB de color gris; está clasificado como un Fluvisol (Tabla 2). El horizonte Ap tiene estructura pobremente desarrollada, muy friable con abundantes raíces, con restos de cerámica en la superficie. El límite con AB es gradual y ondulado. El horizonte AB tiene una estructura en bloques subangulares, friable, pero más compacto. Un paleosuelo subyace al suelo moderno, y ha sido fechado en 3044 años cal AP (Cabadas-Báez, 2004).

2.1.6. Cedazo (CED)

Este perfil se ubica en la parte baja del valle y es un paleosuelo de 0.7 m de espesor, con horizontes Ap-Ah₁-Ah₂, clasificado como un Vertisol. Este suelo corresponde a un paleosuelo sepultado en SNP a 1.25 m de profundidad, que aquí, por procesos de erosión, ha sido expuesto en la superficie y cuya edad es de 3166 años cal AP (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2011). El horizonte superficial Ap posee un color pardo, tiene una estructura granular y relativamente friable. Es muy poroso, tiene abundantes raíces y el límite con el horizonte subyacente es claro y ondulado. Los horizontes Ah₁ y Ah₂ son de color negro, arcillosos (Tabla 2), con una estructura fuertemente desarrollada en bloques subangulares-angulares, muy compacta. Muestran grietas de pequeñas a medianas, las cuales son más pronunciadas y verticales en Ah₂. El límite con el material subyacente,

una roca andesítica, es abrupto.

3. Metodología

Para el análisis de propiedades magnéticas, se limpiaron secciones en los suelos, en las que se colectaron aproximadamente 400 g de suelo con un espaciado vertical de 5 cm. Las muestras se secaron a una temperatura de 40 °C durante 24 horas y posteriormente fueron cuarteadas y conservadas dentro de un blindaje magnético para evitar que adquirieran una remanencia viscosa. Se llevó a cabo una serie de mediciones de parámetros magnéticos que permiten inferir la composición, concentración y distribución de los tamaños de partícula de los minerales magnéticos presentes en cada perfil de suelo.

Para determinar las principales fases magnéticas presentes en los suelos, en muestras de ~ 1 cm³ se midió la susceptibilidad magnética volumétrica (κ) en función de la temperatura con un equipo Bartington (MS2), un sensor (MS2W) y un horno (MS2WFP), entre 20 °C y 650 °C. La identificación de las fases magnéticas presentes se hizo con base en su temperatura de Curie (Collinson, 1983; Tarling, 1983; Dunlop y Özdemir, 1997). En muestras de 8 cm³ encapsuladas en cubos de acrílico inicialmente se midió la susceptibilidad magnética en un sistema Bartington MS2 y un sensor dual MS2B, que es expresada en términos de masa, susceptibilidad magnética de específica (χ), en frecuencias bajas (0.47 kHz) y altas (4.7 kHz). A partir de la χ medida en dos frecuencias, se calculó la susceptibilidad dependiente de la frecuencia $\chi_{df}\%$ = $[(\chi_{\text{baja frecuencia}} - \chi_{\text{alta frecuencia}}) / \chi_{\text{baja frecuencia}}] * 100$.

La magnetización remanente anhisterética (MRA) se obtuvo de la aplicación de un campo directo constante de 50 μ T, sobreimpuesto a un campo alterno decreciente (entre 0 y 100 x 10⁻³ T), en un desmagnetizador Molspin. La magnetización remanente isoterma (MRI) se adquirió aplicando pulsos electromagnéticos con un magnetizador ASC Scientific, modelo IM-10, en campos directos e inversos entre 5 x 10⁻³ T y 1 T. Se consideró como magnetización remanente isoterma de saturación (MRIS_{1T}) a aquella adquirida en un campo directo de 1 tesla. Las remanencias artificiales se midieron con un magnetómetro Molspin Minispin Fluxgate, y a partir de estas remanencias se calcularon las coercitividades remanentes (H_{CR}), los factores S₃₀₀ (MRI_{-300mT}/MRIS_{1T}) y la magnetización remanente isoterma adquirida en campos altos, > 300 mT, MRA₃₀₀ = $[(MRIS_{1T} - MRI_{-300mT})/2]$.

4. Resultados

4.1 Curvas κ vs. T

En general las curvas de κ vs. T son reversibles en la mayoría de los perfiles y similares entre sí (Figura 3),

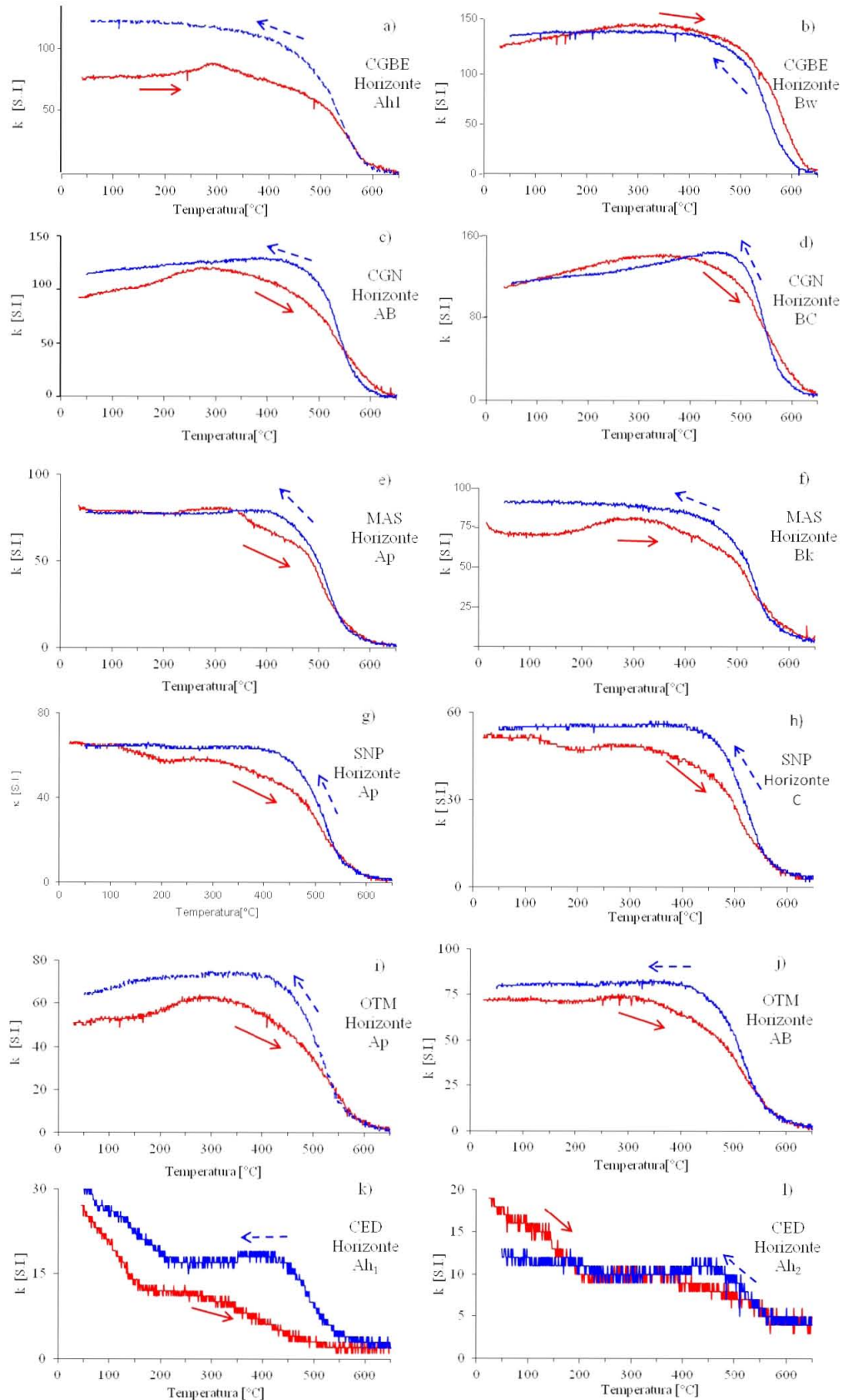


Figura 3. Curvas representativas de la susceptibilidad magnética en función de la temperatura (χ vs. T) utilizadas para identificar la mineralogía magnética presente en los suelos. La línea roja representa el calentamiento, mientras que la azul representa el enfriamiento. Horizontes Ah_1 (a) y Bw (b) de CGBE; horizontes AB (c) y BC (d) de CGN; horizontes Ap (e) y Bk (f) de MAS; horizontes Ap (g) y C (h) de SNP; horizontes Ap y AB de OTM; y horizontes Ah_1 (k) y Ah_2 (l) del perfil CED.

presentando cambios en diferentes intervalos de temperatura. En el perfil CGBE las curvas de κ vs. T de las muestras de los horizontes superficiales Ah no son reversibles (Figura 3a) y presentan un claro incremento entre 200 y 300 °C durante el calentamiento, un suave decremento hasta 530 °C aproximadamente, y abrupto a partir de esa temperatura, mientras que las muestras de la parte baja del perfil (Bw) tienden a ser reversibles (Figura 3b). CGN tiene curvas κ vs. T que se caracterizan por la tendencia a incrementarse desde el inicio del calentamiento, hasta intervalos que oscilan entre 250 y 400 °C, decreciendo posteriormente de forma suave y gradual, incluso por arriba de 600 °C. Al igual que en CGBE, las muestras de los horizontes superficiales Ap y Ah (Figura 3c) poseen curvas irreversibles, mientras que en los horizontes inferiores AB y BC, las curvas tienden a ser reversibles (Figura 3d).

Las curvas de κ vs. T del perfil MAS tienden a ser reversibles en la parte superficial del perfil (Figura 3e), zona donde se observa un ligero aumento en la curva durante el calentamiento que oscila entre 200 y 300 °C. Posteriormente decrecen de forma suave hasta 500 °C y de forma relativamente abrupta hasta el final del proceso, incluso por arriba de 600 °C. Las muestras de ubicadas en la parte baja del perfil (horizontes Bk y C) presentan curvas menos reversibles (Figura 3f).

En SNP, las curvas de κ vs. T son moderadamente reversibles, en especial en la parte superficial del suelo, donde decrecen entre 100 y 150 °C en la etapa de calentamiento, tienen un leve incremento entre 200 y 300 °C y decrecen de forma suave hasta el final del proceso (Figura 3g). En las muestras de la parte baja del perfil, el decremento

es suave entre 300 y 500 °C y abrupto hacia el final del calentamiento (Figura 3h). En OTM, las curvas de κ vs. T (Figuras 3i y 3j) son también moderadamente reversibles, similares a las registradas en SNP. Las curvas del horizonte Ap son las menos reversibles y se caracterizan por un incremento desde el inicio del experimento hasta 250 °C, decrecen suavemente a partir de 300 °C, incluso por arriba de 600 °C (Figura 3i). Durante el proceso de enfriamiento estas muestras son reversibles hasta 550 °C aproximadamente, siendo irreversible en el resto de esta etapa.

En el perfil CED, las curvas κ vs. T se caracterizan por el marcado decremento entre 50 y 200 °C, un segundo decremento entre 350 y 380 °C y entre 550 y 580 °C; a partir de estas temperaturas describen una trayectoria horizontal (Figuras 3k y 3l). En la parte superior del suelo, las curvas tienden a ser menos reversibles (Figura 3k), en tanto que en la parte baja del suelo, las curvas son reversibles (Figura 3l).

4.2 Parámetros magnéticos en función de la profundidad

Las Figuras 4, 5, 6, 7, 8 y 9 muestran las curvas de los parámetros magnéticos analizados en los seis perfiles estudiados. Su posición en el relieve, diferencias climáticas y de vegetación, así como la edad de los materiales parentales han desarrollado suelos con diferentes grados de evolución, lo que se refleja en los parámetros magnéticos.

En el perfil de la cima del cerro Gordo (CGBE), las curvas de los parámetros de los horizontes de este suelo presentan claramente diferencias entre sí. Los perfiles de los parámetros dependientes de la concentración de minerales

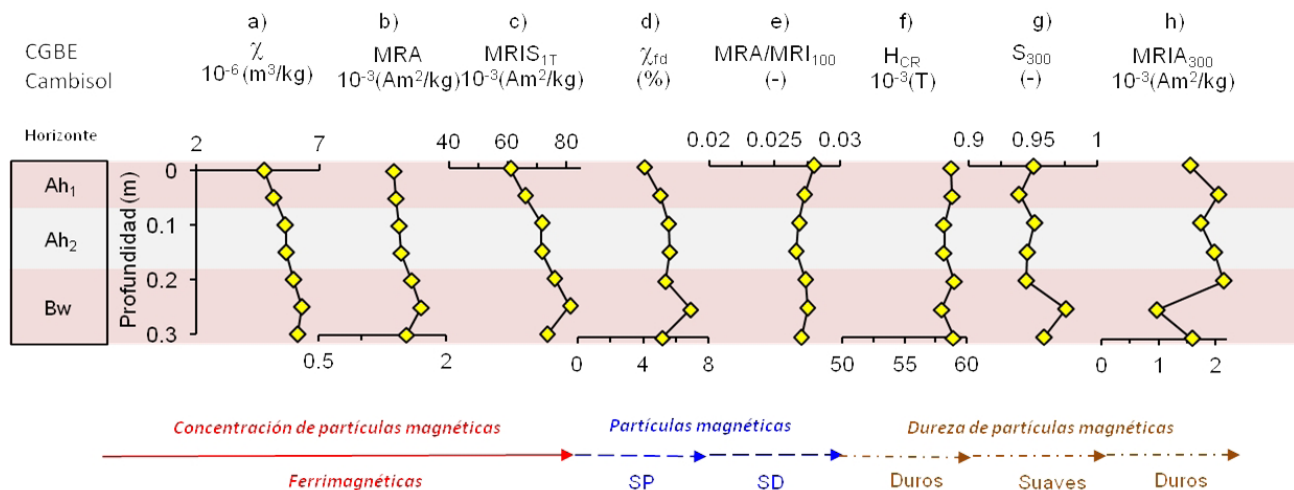


Figura 4. Parámetros magnéticos analizados del suelo CGBE. Las curvas que corresponden a los parámetros magnéticos asociados con la concentración de minerales magnéticos son: a) Susceptibilidad magnética, χ , (concentración de minerales magnéticos); b) Magnetización remanente anhisterética MRA (concentración de ferrimagnéticos, sensible a la abundancia de partículas de dominio sencillo DS, $< 0.1 \mu\text{m}$); y c) Magnetización remanente isoterma de saturación MRIS_{1T} (concentración de ferrimagnéticos). Las curvas relacionadas con los parámetros de distribución de tamaño de partícula son: d) Susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia χ_{fd} (%) (partículas SP, $< 0.01 \mu\text{m}$); y e) Cociente $\text{MRA}/\text{MRI}_{100}$ (abundancia de partículas DS). Los parámetros magnéticos asociados con la “dureza” de las partículas magnéticas son: f) Coercitividad remanente H_{CR} (sensible a la presencia de partículas “duras”, hematita, goethita y magnetita DS); g) Cociente S_{300} (abundancia relativa de minerales magnéticamente “duros”); y h) Magnetización remanente isoterma de saturación en campos altos ($> 300 \text{ mT}$), MRIA_{300} (concentración de hematita o goethita).

magnéticos (χ , MRA y $MRIS_{1T}$) oscilan entre 2.99×10^{-6} y $6.47 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$; 0.85×10^{-3} y $1.7 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$; y 62.73×10^{-3} y $79.32 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$, respectivamente. Se caracterizan por mostrar los valores más altos en el horizonte Bw y una disminución hacia la parte superficial, alcanzando en la cima del horizonte Ah_1 los más bajos (Figuras 4a, 4b y 4c). Los parámetros $\chi_{fd}\%$ y MRA/MRI_{100} (dependientes de tamaños de dominio pequeños) varían entre 2.5 y 6.9 %, y entre 0.027 y 0.028, respectivamente. El parámetro $\chi_{fd}\%$ registra un aumento moderado en el horizonte Bw y decrece en los horizontes A (Figura 4d). El cociente MRA/MRI_{100} también muestra un ligero aumento tanto en el horizonte Bw como en el Ah_1 (Figura 4e). Los parámetros relacionados con la dureza de las partículas magnéticas (H_{CR} , S_{300} y $MRIA_{300}$) presentan únicamente ligeras variaciones a lo largo del perfil, y sus valores oscilan entre 58×10^{-3} y $59 \times 10^{-3} \text{ T}$; 0.93 y 0.97 %; y 0.96×10^{-3} y $2.13 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$, respectivamente (Figuras 4f, 4g y 4h).

En el perfil ubicado en la ladera de cerro Gordo (CGN), las curvas de los parámetros analizados también presentan contrastes entre los diferentes horizontes: χ (2.99×10^{-6} a $5.82 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$), MRA (0.85×10^{-3} a $1.71 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$) y $MRIS_{1T}$ (40.28×10^{-3} a $61.55 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$) presentan los valores más bajos en la transición entre los horizontes BC y AB (de 0.50 a 0.45 m de profundidad), mientras que en los horizontes Ah y Ap se registran los valores más altos (Figuras 5a, 5b y 5c). Los parámetros $\chi_{fd}\%$ y MRA/MRI_{100}

oscilan entre 2.5 y 5.1 % y entre 0.025 y 0.041, respectivamente. En el horizonte BC se presentan los valores más bajos de ambos parámetros, en tanto que en los horizontes AB y Ah existe un aumento moderado (más marcado en MRA/MRI_{100}), que representa los mayores valores encontrados en estos parámetros (Figuras 5d y 5e). Los parámetros de dureza magnética (Figuras 5f, 5g y 5h) presentan un comportamiento relativamente constante, varían entre 55×10^{-3} y $56 \times 10^{-3} \text{ T}$ (H_{CR}); 0.94 a 0.96 % (S_{300}) y 0.93×10^{-3} a $1.67 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ($MRIA_{300}$). Las mayores variaciones están en $MRIA_{300}$, con los valores más altos en la parte baja de BC y en Ap.

En el perfil MAS los parámetros magnéticos presentan ligeras variaciones verticales: χ varía entre 2.65×10^{-6} y $5.53 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$; MRA entre 0.60×10^{-3} y $1.01 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$; y $MRIS_{1T}$ entre 20.77×10^{-3} y $27.04 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$. La más notoria de estas variaciones es el aumento en χ en la parte superior del horizonte Bk (Figura 6a), mismo que no se refleja en MRA ni $MRIS_{1T}$. Los parámetros $\chi_{fd}\%$ y MRA/MRI_{100} oscilan entre 2.6 y 6.9 % y entre 0.030 y 0.051, respectivamente. Ambos parámetros tienen valores moderadamente altos en el horizonte C y en la parte baja de Bk, mientras que en la parte superior de Bk y en el horizonte Ap presentan sus menores valores (Figuras 6d y 6e). Los parámetros H_{CR} , S_{300} y $MRIA_{300}$ muestran valores constantes que oscilan entre 54×10^{-3} y $56 \times 10^{-3} \text{ T}$ (H_{CR}); 0.93 y 0.97 % (S_{300}); y 0.307×10^{-3} y $0.795 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ ($MRIA_{300}$),

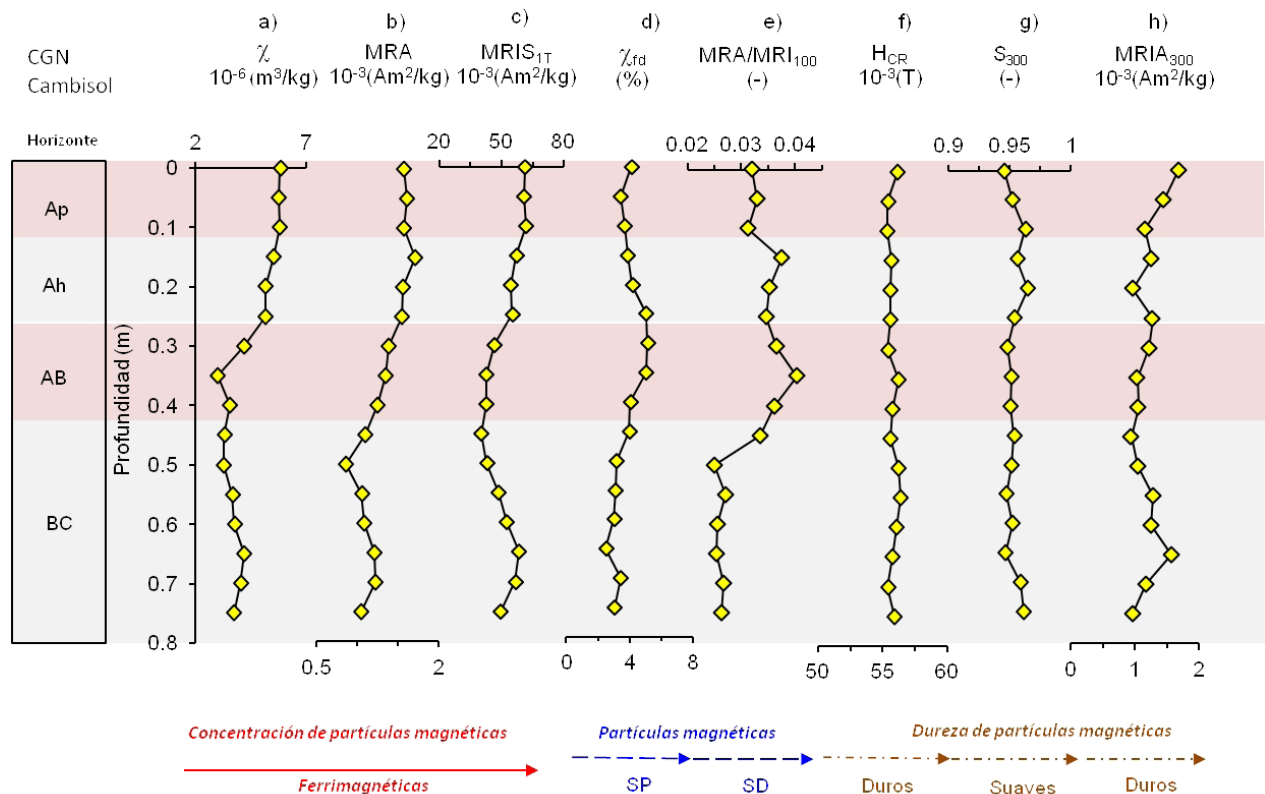


Figura 5. Parámetros magnéticos analizados para el perfil CGN. (Ver pie de Figura 4).

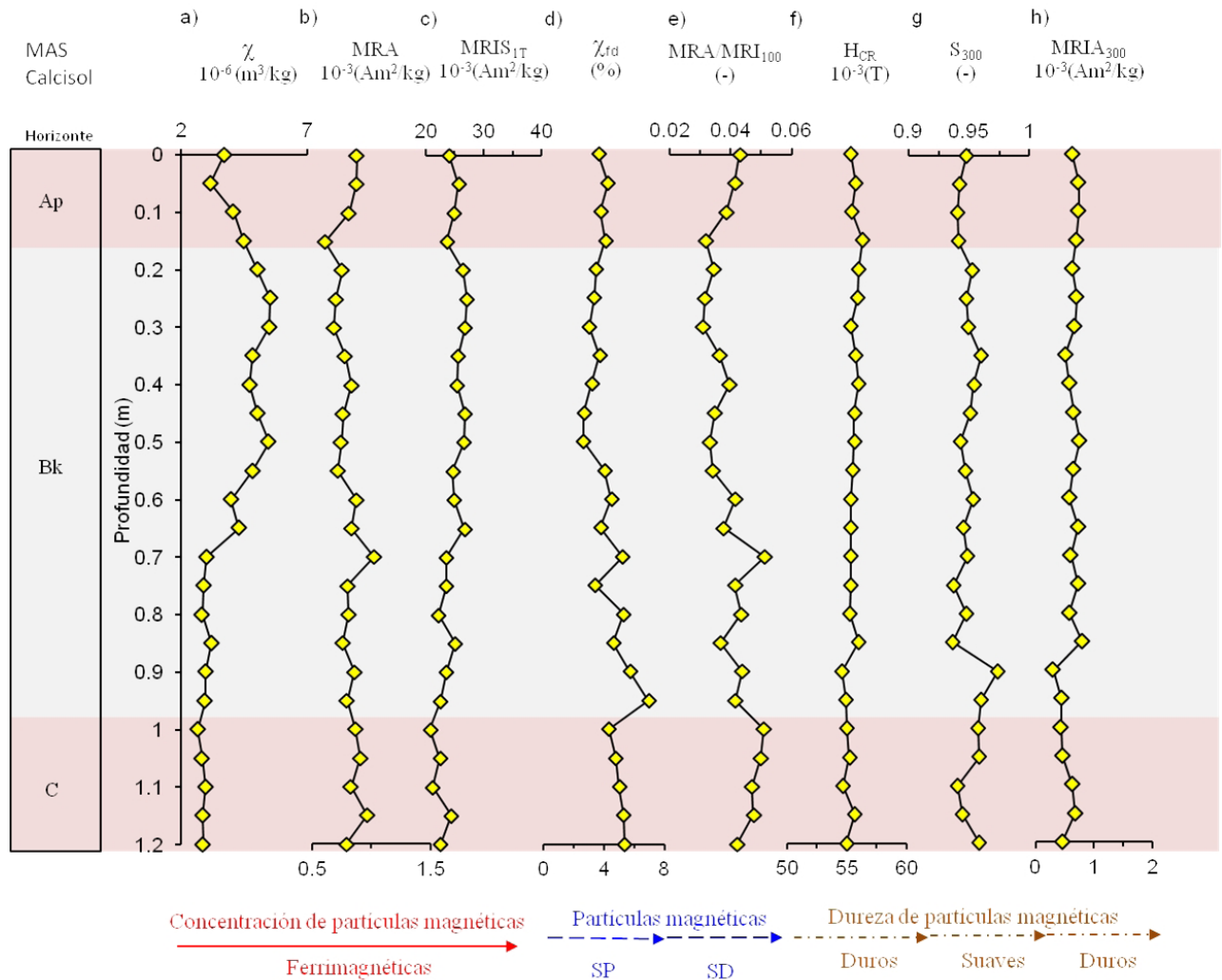


Figura 6. Parámetros magnéticos analizados para el perfil MAS. (Ver pie de Figura 4).

sin variaciones significativas a lo largo del perfil.

En el perfil San Pablo (SNP) los parámetros magnéticos analizados se caracterizan por tener curvas con variaciones relativamente pequeñas. Los parámetros de concentración magnética (Figuras 7a, 7b y 7c) oscilan entre 2.78×10^{-6} y $3.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ (χ); 0.555×10^{-3} y $0.627 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ (MRA); y 21.76×10^{-3} y $24.34 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ (MRIS_{1T}). $\chi_{fd}\%$ varía entre 3 y 5 %, cuyo valor más alto se presenta en la parte superior del horizonte Ap. $\text{MRA}/\text{MRI}_{100}$, cuyos valores varían entre 0.032 y 0.037, describe una trayectoria similar a $\chi_{fd}\%$ (Figura 7d), mientras que H_{CR} (de 58×10^{-3} a $61 \times 10^{-3} \text{ T}$), S_{300} (de 0.90 a 0.94 %) y MRIA_{300} (de 0.6121×10^{-3} a $1.13 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$) no registran cambios significativos, salvo la ocurrencia de mayores coercitividads (S_{300} y MRIA_{300}) en la parte baja del horizonte C (Figuras 7e, 7f, 7g y 7h).

En Otumba (OTM) las variaciones en los parámetros analizados son sutiles, (χ , de 2.43×10^{-6} a $3.40 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$; MRA, de 0.579×10^{-3} a $1.10 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$; y MIRS_{1T} , de 23.31×10^{-3} a $28.30 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$). En general, en el

horizonte AB el comportamiento de los parámetros es casi constante, con ligeras variaciones en la transición al horizonte Ap. Los parámetros χ y MRIS_{1T} muestran un ligero aumento en el horizonte Ap con relación al horizonte subyacente AB (Figuras 8a y 8c). La mayor diferencia está en los perfiles $\chi_{fd}\%$ (de 4 a 26 %) y $\text{MRA}/\text{MRI}_{100}$ (de 0.027 a 0.048), que son mayores en AB y disminuyen en Ap (Figuras 8f y 8g). De manera correspondiente, los parámetros H_{CR} (de 44.5×10^{-3} a $46 \times 10^{-3} \text{ T}$), S_{300} (de 0.92 a 0.94 %) y MRIA_{300} (de 0.683×10^{-3} a $1.07 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$) presentan en general la mayor coercitividad en el horizonte Ap (Figuras 8h y 8j).

Los gráficos de los parámetros magnéticos en el perfil Cedazo (CED) en su mayor parte muestran variaciones sistemáticas entre los horizontes que lo constituyen. Los parámetros de concentración oscilan entre 0.86×10^{-6} y $5.15 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ (χ); 0.107×10^{-3} y $0.307 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ (MRA); y 3.94×10^{-3} y $33.01 \times 10^{-3} \text{ Am}^2/\text{kg}$ (MIRS_{1T}). Éstos presentan los valores más bajos en el horizonte Ah₂ y la parte baja del Ah₁ (entre 0.7 y 0.3 m de profundidad), y a

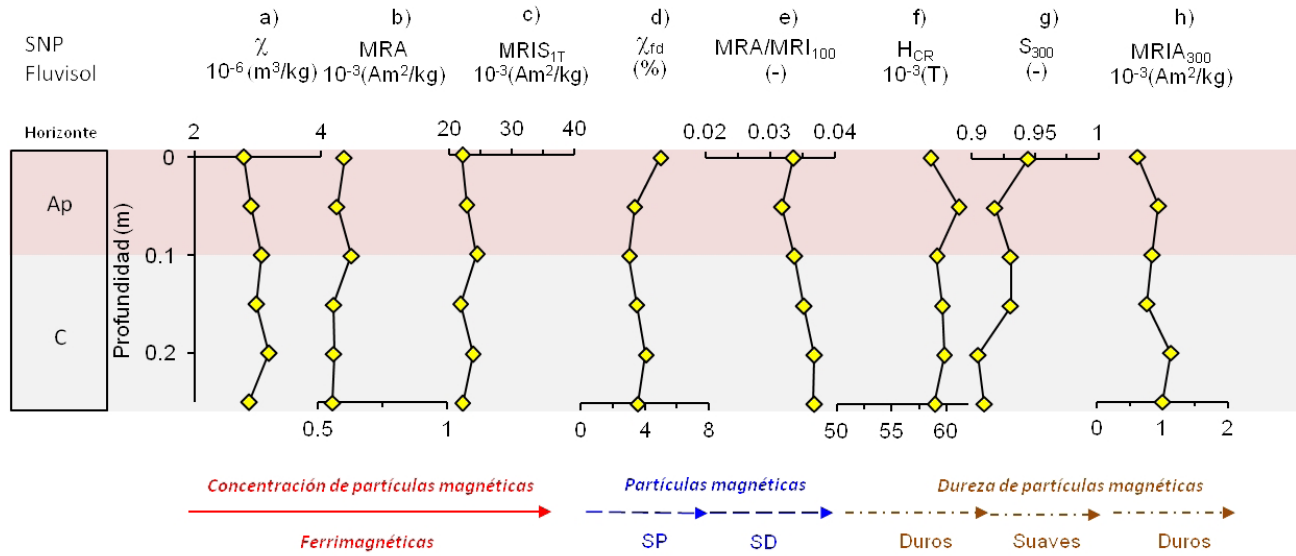


Figura 7. Parámetros magnéticos analizados para el perfil SNP. (Ver pie de Figura 4).

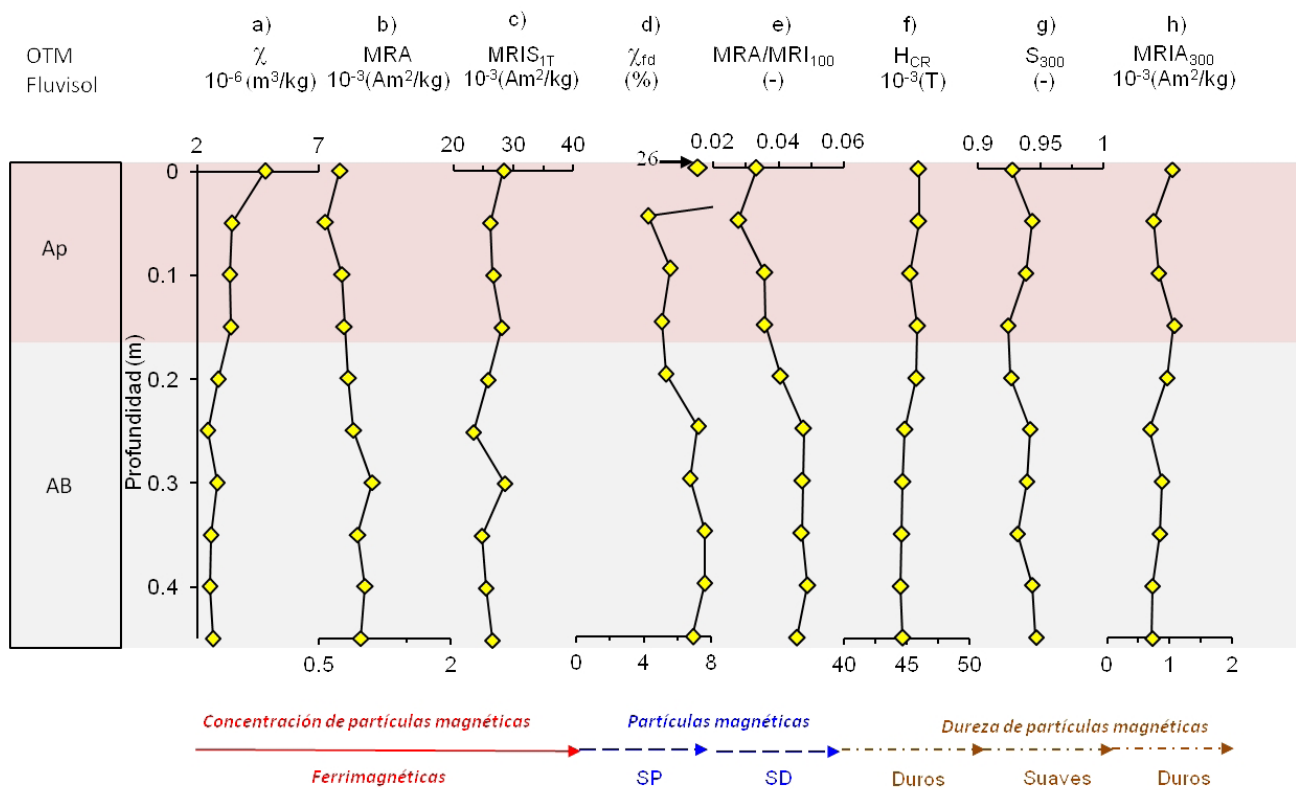


Figura 8. Parámetros magnéticos analizados para el perfil OTM. (Ver pie de Figura 4).

partir de ese nivel aumentan hasta la superficie (Figuras 9a, 9b y 9c). Los parámetros $\chi_{fd}^{\%}$ y MRA/MRI_{100} varían entre 0.2 y 4 % y 0.014 y 0.040, respectivamente. El incremento en los parámetros de concentración en la parte superior del perfil coincide con la disminución en $\chi_{fd}^{\%}$ y MRA/MRI_{100} (Figuras 9d y 9e). Los parámetros de coercitividad son

relativamente constantes a lo largo del perfil, oscilan entre 60×10^{-3} y 78×10^{-3} T (H_{CR}); 0.85 y 0.97 % (S_{300}); y 0.075×10^{-3} y 1.474×10^{-3} Am²/kg ($MRIA_{300}$), aunque las pequeñas diferencias no son consistentes entre sí. En la transición entre los horizontes Ah₁ y Ap hay un ligero aumento en la coercitividad (Figuras 9f y 9g).

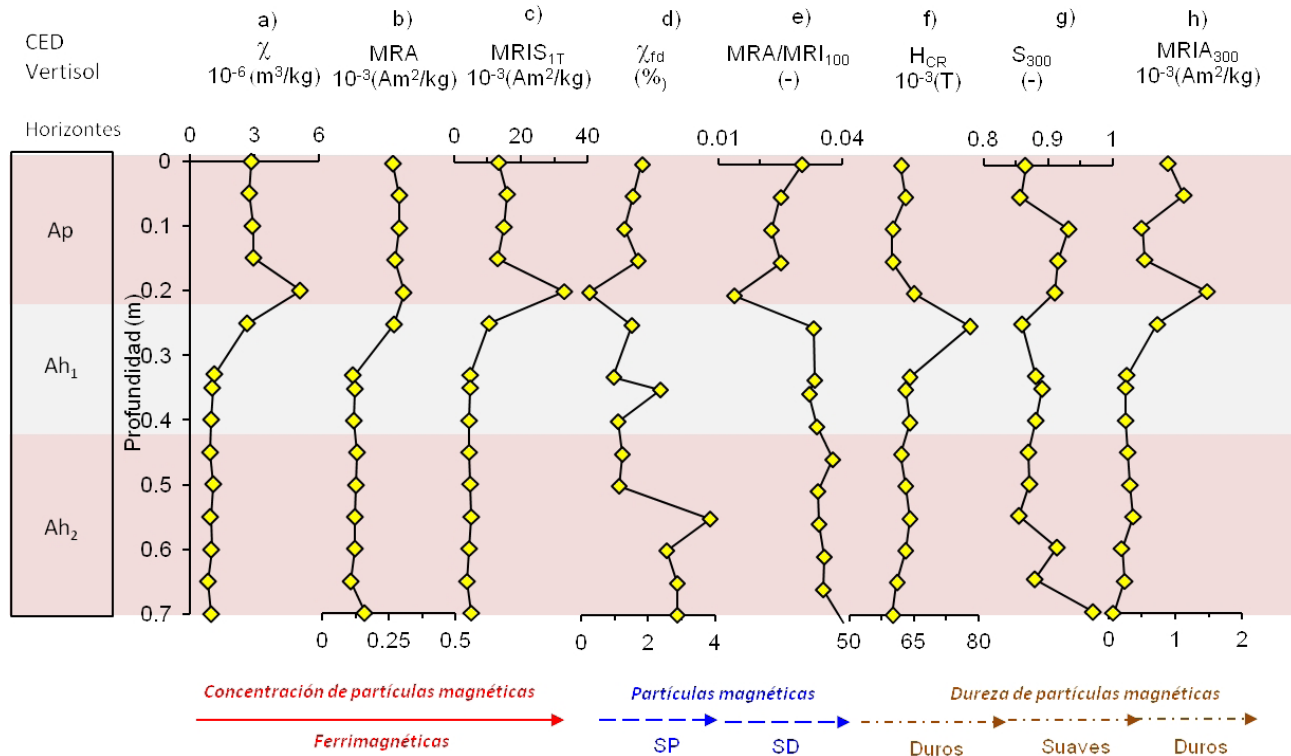


Figura 9. Parámetros magnéticos analizados para el perfil CED. (Ver pie de Figura 4).

5. Discusión

5.1. Interpretación de parámetros magnéticos

La χ es la suma de la contribución de minerales tanto ferrimagnéticos como antiferrimagnéticos y paramagnéticos (ferromagnesianos en general), en tanto que los parámetros MRA y $MRIS_{1T}$ lo son sólo de las partículas ferrimagnéticas. La medición de la susceptibilidad magnética (κ) durante el calentamiento permite la identificación directa de los minerales magnéticos presentes a través de la temperatura de Curie. Esta temperatura es de 580 °C para la magnetita pura, entre 597 y 657 °C para la maghemita, 675 °C para la hematita y entre 80 y 150 °C para la goethita (Morin *et al.*, 1950; Hunt *et al.*, 1995; Özdemir *et al.*, 1993; Özdemir y Dunlop, 1996). El contenido de Ti en magnetita y maghemita decrece la temperatura de Curie (Miyahara, 1972; Aragón *et al.*, 1985). Sin embargo, la información que brindan las curvas κ vs. T es en ocasiones incompleta debido a que en estos análisis, por una parte, las fases ferrimagnéticas (Ti-magnetita y Ti-maghemita) dominan sobre las antiferrimagnéticas (hematita y goethita) y, por la otra, durante el calentamiento ocurren una serie de transformaciones en los minerales magnéticos, lo que es la causa más probable de la irreversibilidad de las curvas durante el enfriamiento (Dunlop y Özdemir, 1997). Por

ello, la información obtenida con las mediciones κ vs. T se complementa con otros indicadores de mineralogía magnética basados en la coercitividad (H_{CR} , cocientes S_{300} y $MRIA_{300}$), los cuales discriminan las fases magnéticas duras (hematita y goethita) que están pobremente representadas en los análisis κ vs. T. La coercitividad remanente H_{CR} (el valor del campo inverso necesario para convertir una magnetización de saturación en cero remanencia) depende no sólo de la mineralogía (mayores valores de H_{CR} en hematita y goethita), sino del tamaño de partícula, ya que los granos finos DS tienen mayor coercitividad. El cociente S_{300} es interpretado como un indicador de la abundancia relativa de minerales magnéticos duros, en el cual valores menores indican mayor abundancia de hematita o goethita, mientras que valores altos de $MRIA_{300}$ son un indicador de la concentración de los mismos (Opdike y Channell, 1996).

Los cocientes indicadores de tamaño de partícula son χ_{fd} % y MRA/MRI_{100} . χ_{fd} % es indicador de la existencia de partículas ultrafinas superparamagnéticas (SP, < 0.01 μ m), en el que χ_{fd} % < 2 % implica que la abundancia de partículas SP es menor al 10%; χ_{fd} % ~ 8 % indica un contenido de SP > 75 %; y χ_{fd} % con valores entre 10 y 14 % indica la predominancia partículas SP (Dearing, 1994; Dearing *et al.*, 1997). El cociente de la MRA normalizada por la MRI obtenida en un campo de 100 x 10⁻³ T (MRA/MRI_{100}) es utilizado para estimar la abundancia relativa de partículas DS (Hunt *et al.*, 1995). Los diagramas de dispersión que combinan la información obtenida a través de los parámetros

magnéticos, permiten comparar las características de las propiedades magnéticas de todos los perfiles de suelos en conjunto.

5.2 Propiedades magnéticas de los perfiles

De acuerdo a las curvas κ vs. T, a lo largo del perfil CGBE (Cambisol) la fase dominante es Ti-magnetita, que en los horizontes superficiales coexiste con Ti-maghemita y con hematita (Figura 3a). En el horizonte Bw hay una proporción menor de hematita (Figura 3b). Ésta no se refleja en las curvas S_{300} y H_{CR} , aunque $MRIA_{300}$ es ligeramente alto (Figuras 4f, 4g y 4h). La continua disminución en la concentración magnética hacia la parte superficial del suelo (Figuras 4a, 4b y 4c) coincide con un decremento en la cantidad de partículas SP, y aunque también hay un leve decremento en el contenido de partículas DS, éstas aumentan levemente en el horizonte Ah₁. Estas características sugieren que en el perfil CGBE ocurre una destrucción gradual de la mineralogía magnética primaria, Ti-magnetita y Ti-maghemita, hacia la cima del mismo, lo que resulta también en el engrosamiento del tamaño de partícula. En el horizonte Ah₁, el leve incremento de partículas DS es posible que resulte de la destrucción parcial de partículas MD.

Las curvas κ vs. T de CGN (Cambisol) sugieren que las Ti-maghemita y Ti-magnetita son las fases mineralógicas más abundantes, y en menor proporción está presente hematita en todo el perfil (Figuras 3c y 3d). Al igual que en CGBE, los parámetros de coercitividad no muestran una contribución importante de hematita (Figuras 5f, 5g y 5h), por lo que sus variaciones reflejan mayormente fluctuaciones en el tamaño de partículas. Únicamente hay un leve aumento en el contenido de hematita en el horizonte Ap. En CGN, el cambio más notable en las propiedades magnéticas es el aumento en la concentración en los tres horizontes superiores, especialmente Ah y Ap (Figuras 5a, 5b y 5c). Este aumento coincide con el incremento de partículas finas SP y DS (Figuras 5d y 5e), particularmente en los horizontes AB y Ah. La falta de simultaneidad en el aumento entre los parámetros dependientes de la concentración se explica porque éstos responden a tamaños específicos de partícula o de mineralogía. De acuerdo a esto, el horizonte BC tiene baja concentración ferrimagnética dominada por partículas gruesas tales como Ti-magnetita MD, en los horizontes AB y Ah hay un aumento de Ti-magnetita de tamaño SP y DS, mientras que en el horizonte Ap hay un engrosamiento en el tamaño de partícula (> MD) y un leve aumento de hematita.

En MAS (Calcisol) las curvas κ vs. T registran en todo el perfil mezclas de minerales magnéticos que son controladas por fases de Ti-magnetita y que coexisten con Ti-maghemita y en menor proporción con hematita, misma que no se registra en las muestras analizadas en el horizonte Bk (Figura 3f). El contenido de minerales que contribuyen a $MRIA_{300}$ (hematita y goethita) es de los más bajos registrados en todos los perfiles analizados. Los

parámetros H_{CR} , S_{300} y $MRIA_{300}$ muestran valores constantes, lo que indica que no hay variaciones significativas en la composición de los minerales magnéticos a lo largo del perfil (Figuras 6f, 6g y 6h). En la parte superior del horizonte Bk, χ aumenta ligeramente, no así MRA ni $MRIS_{1T}$, lo que sugiere que este incremento se debe a la presencia de minerales paramagnéticos que contribuyen a χ , pero no a la remanencia (Figuras 6a, 6b y 6c). Los valores moderadamente altos en χ_{fid} % y MRA/ MRI_{100} en el horizonte C y la parte baja de Bk indican una mezcla de tamaños de partículas SP-DS-MD en estas porciones, en tanto que en la parte superior de Bk y el horizonte Ap hay un ligero engrosamiento de las partículas y los tamaños cambian a una asociación de tamaños MD con cantidades menores de DS.

En SNP (Fluvisol) las curvas κ vs. T señalan mezclas relativamente más homogéneas en composición, en las cuales la Ti-magnetita coexiste con las fases de Ti-maghemita. El suave decaimiento entre 100 y 150 °C sugiere la presencia de goethita (Figuras 3g y 3h). Sólo el horizonte Ap presenta un decaimiento en κ arriba de 580 °C, lo que indica la presencia de hematita. La presencia de fases magnéticamente duras (hematita y goethita) no tienen una franca expresión en los indicadores de coercitividad, únicamente se reflejan tenuemente en el incremento en $MRIA_{300}$ y el decremento en S_{300} en la parte baja del horizonte C (Figura 7). En SNP los parámetros magnéticos presentan variaciones relativamente pequeñas que no permiten establecer de forma clara diferencias en el comportamiento de los mismos, en especial los parámetros de concentración magnética. Los valores de χ , MRA y $MRIS_{1T}$ indica una escasa presencia de minerales ferrimagnéticos (Figuras 7a, 7b y 7c). La variación en los indicadores de tamaño de partícula es mínima y los valores relativamente bajos de χ_{fid} % y MRA/ MRI_{100} sugieren dominancia de tamaños MD con cantidades menores de DS y SP.

Las muestras analizadas por κ vs. T del perfil OTM (Fluvisol) registran una mezcla de Ti-maghemita y Ti-magnetita, que coexisten con hematita (Figuras 3i y 3j). La coercitividad, observada en los parámetros H_{CR} , S_{300} y $MRIA_{300}$, es levemente mayor en la transición de horizontes AB-Ap y en la parte más superficial del perfil, pero no indican cantidades abundantes de hematita (Figura 8). Las variaciones en los perfiles de los parámetros analizados son sutiles pero, en general, en el horizonte AB la concentración ferrimagnética, reflejada en χ y $MRIS$, es baja y se incrementa en el horizonte Ap, alcanzando su valor más alto en la superficie del perfil. Los parámetros χ_{fid} % y MRA/ MRI_{100} en el horizonte AB sugieren mezclas con un contenido cercano al 75 % de partículas SP y un aumento de partículas DS, mismas que disminuyen en Ap, lo que sugiere un engrosamiento del tamaño de partícula en ese horizonte. Únicamente en la parte superficial de Ap dominan las partículas SP (> 75 %).

En los horizontes Ah₁ y Ap de CED, el súbito decremento en κ vs. T entre 50 y 150 °C sugiere la presencia de Ti-magnetita o Ti-maghemita con alto contenido de Ti

(Figura 3k), en tanto que en el horizonte Ah₂ el contenido de Ti es menor. En este horizonte, el cambio de pendiente en la curva κ vs. T alrededor de los 150 °C (Figura 3l), sugiere la presencia de goethita. Los parámetros H_{CR} y S₃₀₀ presentan los valores más altos y más bajos, respectivamente, de todos los suelos analizados, lo que apoya la existencia de minerales antiferrimagnéticos en el perfil (Figuras 9f y 9g). En los horizontes Ah₂ y Ah₁, MR_A indica bajas concentraciones de estos minerales, por lo que los relativamente bajos valores de S₃₀₀ y altos valores de H_{CR} en ellos también pueden indicar partículas ferrimagnéticas de mayor dureza (DS). CED presenta en los horizontes Ah₂ y Ah₁ las menores concentraciones de minerales ferrimagnéticos encontradas en este estudio. En la parte superior del perfil, a partir de la transición entre

los horizontes Ah₁ y Ap, hay un enriquecimiento tanto de partículas ferrimagnéticas como de antiferrimagnéticas, caracterizado por un aumento en el tamaño de partícula, MD (< MRA/MR₁₀₀), y nulo contenido de SP (χ_{fd} % < 2%).

5.3. Relaciones entre parámetros magnéticos de los suelos

Los gráficos entre parámetros magnéticos en diagramas de dispersión son de gran utilidad, ya que permiten comparar las características de las propiedades magnéticas de todos los perfiles en su conjunto (Figura 10). La relación χ vs. MR_{IS,IT} es útil para determinar la concentración de minerales ferrimagnéticos y evaluar la presencia de minerales paramagnéticos o antiferrimagnéticos y las mezclas de tamaños (Thompson y Oldfield, 1986). En este diagrama, las

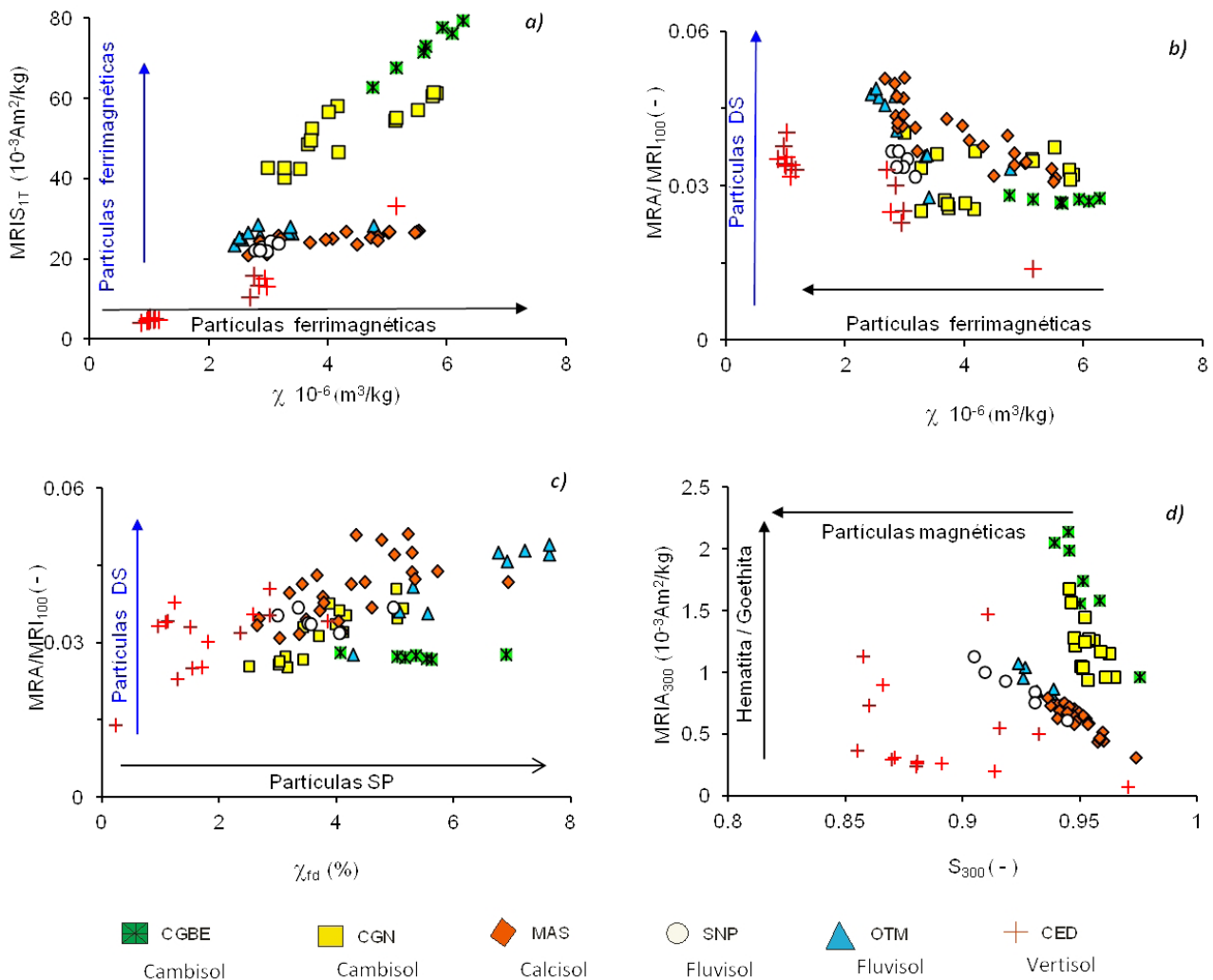


Figura 10. Diagramas de dispersión de algunos parámetros magnéticos. a) χ vs. MR_{IS,IT} muestra principalmente la concentración de minerales ferrimagnéticos; las concentraciones crecientes de (Ti-)magnetita se ubican hacia el extremo superior derecho; los minerales paramagnéticos contribuyen a la χ pero no a MR_{IS,IT}; los minerales de alta coercitividad (hematita y goethita) tienden a ubicarse en la parte baja y derecha del diagrama. b) χ vs. MRA/MR₁₀₀ ilustra la relación entre la concentración magnética y el tamaño de partícula DS-PDS. c) χ_{fd} % vs. MRA/MR₁₀₀ permite analizar las variaciones en las fracciones de partículas más finas, SP y DS, respectivamente d) S₃₀₀ vs. MR₃₀₀ muestra la relación entre la concentración absoluta y relativa de minerales de alta coercitividad (hematita y goethita).

concentraciones crecientes de (Ti-)magnetita se ubican hacia el extremo superior derecho. Los minerales paramagnéticos contribuyen de manera moderada a la χ pero no a MRIS_{1T} , mientras que los minerales de alta coercitividad (hematita/goethita) tienden a ubicarse en la parte baja y derecha del diagrama. Las magnetitas DS tienden a describir la diagonal de mayor pendiente y las mezclas con altas concentraciones de partículas MD y SP tienden a situarse por debajo de ésta, debido a que contribuyen a la χ pero en menor medida a MRIS_{1T} (Figura 10a).

En esta figura, los suelos analizados se distribuyen a lo largo de una diagonal en la que el perfil CGBE presenta la mayor concentración de minerales ferrimagnéticos de todos los suelos analizados. Por el contrario, las muestras del perfil CED, que se distribuyen en dos grupos, presentan las menores concentraciones. SNP y OTM se ubican entre los anteriores. El perfil MAS y un grupo de CED se sitúan por debajo de la diagonal, lo que se puede interpretar de forma diferente. Los bajos valores en ambos parámetros en CED sugieren poca presencia de ferrimagnéticos y probablemente mayor contribución de minerales para- y antiferrimagnéticos, mientras que el comportamiento de las muestras de MAS (bajo MRIS_{1T} y alto χ) indican una mayor abundancia de minerales paramagnéticos.

La relación entre la concentración magnética y el tamaño de partícula DS se ilustra en el diagrama χ vs. $\text{MRA}/\text{MRI}_{100}$ (Figura 10b). En general, los suelos presentan una relación inversa, en donde los suelos con mayor concentración (CGBE, CGN) presentan también la menor abundancia de partículas finas DS, en tanto que el suelo con menor concentración (OTM) presenta una mayor abundancia de DS ($\text{MRA}/\text{MRI}_{100} > 0.05$). Esta relación inversa sugiere que un posible enriquecimiento en la concentración no está asociado a un aumento en partículas finas. Los suelos MAS y CGN presentan la mayor dispersión, entre los valores extremos, lo que indica la mayor variabilidad en el tamaño de partículas en ellos. CED presenta valores bajos e intermedios en $\text{MRA}/\text{MRI}_{100}$, lo que sugiere variaciones menores en el contenido de DS.

El diagrama $\chi_{fd}\%$ vs. $\text{MRA}/\text{MRI}_{100}$ permite analizar las variaciones en las fracciones de partículas más finas, SP y DS, respectivamente (Figura 10c). Aunque con cierta dispersión, se observa una relación directa entre ambos parámetros, lo que sugiere que aquellos suelos con la mayor abundancia de partículas DS también presentan la mayor abundancia de partículas ultrafinas SP (OTM). En este diagrama, las muestras de CGN se distribuyen mayormente a lo largo de la diagonal; sin embargo, aunque CGBE y un grupo de MAS contienen de manera moderada partículas SP, tienen una abundancia baja y alta, respectivamente, de partículas DS.

Por otro lado, la relación entre la concentración absoluta y relativa de minerales de alta coercitividad (hematita/goethita) se muestra en el diagrama S_{300} vs. MRIA_{300} (Figura 10d). En general, se presenta una relación inversa entre ellos, en la que las muestras de suelos analizados describen

dos trayectorias. MAS, OTM y SNP se agrupan en una diagonal de menor pendiente, con valores relativamente bajos de MRIA_{300} y altos de S_{300} , lo que indica bajas concentraciones de hematita/goethita. Por arriba de ellos, a lo largo de una diagonal de mayor pendiente se agrupan CGBE y CGN; sin embargo, éstos presentan altos valores en S_{300} y en MRIA_{300} . Ya que en estos suelos se presenta la mayor concentración absoluta tanto de hematita/goethita como de ferrimagnéticos, es posible que la importancia de los minerales de alta coercitividad decrezca debido a un aumento aún mayor en los ferrimagnéticos de baja coercitividad. Por otra parte, en CED las bajas concentraciones de minerales ferrimagnéticos permiten que las moderadas concentraciones de antiferrimagnéticos resalten en S_{300} .

5.4. Grado de pedogénesis y su relación con los parámetros magnéticos

Es evidente que existe una marcada diferenciación de las propiedades magnéticas en función del grado de pedogénesis. Los parámetros magnéticos presentan una estrecha asociación entre las condiciones bajo las que se desarrolla cada suelo, su grado de evolución y los procesos pedogenéticos que transforman la composición y distribución de los minerales magnéticos.

De esta forma, los suelos presentan un comportamiento magnético que varía entre dos extremos, según se aprecia en los diagramas de dispersión (Figura 10): 1) perfiles con mayor concentración y mayor tamaño de partícula (Cambisoles CGBE y CGN); y 2) perfiles con menor concentración y en general menor tamaño de partícula (Fluvisoles SNP y OTM). Entre estos dos extremos se encuentra el Calcisol MAS, en el cual, a medida que se incrementa la concentración, disminuye el contenido de partículas finas. El Vertisol CED, dada su mayor dispersión, no entra en ninguno de los grupos anteriores, pero se observa que tiene una baja concentración y tamaños de partícula magnética MD.

Los suelos con desarrollo moderado (CGBE, CGN), con una edad estimada de 6000 años, muestran que a pesar de tener la misma etapa evolutiva (ambos Cambisoles), presentan propiedades magnéticas ligeramente diferentes. CGBE tiene la mayor concentración tanto de Ti-magnetitas/Ti-maghemitas como de hematita/goethita (Figura 3) y una mezcla bimodal de tamaños de partícula en la que dominan los granos gruesos MD con cantidades moderadas de SP. Las concentraciones más altas y con partículas más finas se presentan en el horizonte Bw. La disminución de la concentración de minerales ferrimagnéticos y de los granos de tamaño SP en la parte superficial (Figuras 4a, 4b y 4c) puede estar relacionada a un rápido lavado del material con una incipiente eluviación-iluviación, que son controlados por las condiciones de humedad, la estabilidad del sitio (ubicado en un ambiente protegido por vegetación forestal), el buen drenaje, la textura y el alto contenido de la fracción

limo. Esto permite el lavado hacia la parte baja del suelo, en donde se presenta la zona de mayor concentración y alteración de minerales, formándose óxidos de hierro de tamaño ultrafino (SP), en donde coexisten los minerales magnéticamente suaves y duros. Como consecuencia de este lavado, la parte superficial del perfil se empobrece de partículas SP que resulta en un aumento neto en el tamaño de partícula magnética (Figura 4d).

En CGN la mineralogía magnética es la misma que en CGBE, aunque en menores concentraciones y con mezclas de tamaños MD y proporciones menores de partículas SP (Figuras 5d, 5e y 10c). En contraste con CGBE, en CGN la mayor concentración magnética así como un ligero engrosamiento en el tamaño de partícula se presenta en los horizontes Ap y Ah, en tanto que en el horizonte AB se observa la disminución en la concentración y un ligero incremento en partículas finas y ultrafinas (Figura 5d y 5e). Aunque los valores de Feo y Fed son similares en el perfil, el cociente Feo/Fed sugiere que es el horizonte Ap el que muestra un bajo intemperismo (Tabla 2), de tal manera que los minerales litogénicos permanecen inalterados. Las observaciones de Cabadas-Báez (2004) apoyan esta interpretación, ya que en Ap se registra un aumento en el contenido de ferromagnesianos, en relación con el resto del perfil.

A diferencia de lo que sucede en las secuencias de loess-paleosuelos que registran un aumento en χ en la parte superficial, originado por un incremento de minerales ferrimagnéticos y antiferrimagnéticos de tamaño SP a DS, en CGN el realce observado se debe a un aumento en el contenido de partículas gruesas MD, por lo que en este caso no es resultado de la neoformación de minerales magnéticos. La explicación a este comportamiento se asocia a procesos de incorporación de nuevos materiales volcánicos en la superficie (posiblemente ceniza que cayó principalmente en esta superficie y que se mezcló en el horizonte Ap), los cuales contribuyen fuertemente a incrementar la señal. El alto contenido de arena en Ap (50 %) marca claramente esta discontinuidad.

Las diferencias en las propiedades magnéticas de los Cambisoles de Teotihuacán se asocian a: 1) el aporte de materiales alóctonos en la superficie del perfil CGN; y 2) la modificación de la cubierta vegetal, de bosque de encino en CGBE a cultivos de *Opuntia* en CGN. Este cambio de uso de suelo repercute en el contenido y tipo de materia orgánica, así como en los procesos relacionados con su humificación y mineralización. Este cambio se aprecia claramente en los contenidos de carbono orgánico, los cuales son del 5.5 % para el horizonte Ah en CGBE y de 1.6 % para CGN (Tabla 2). Además, el valor del isótopo estable de carbono en cerro Gordo documenta una firma de $\delta^{13}\text{C}$ de -20 ‰, la cual es diferente para un suelo bajo vegetación forestal (Lounejeva Baturina et al., 2007a, 2007b). La deforestación que ha sufrido la zona de Teotihuacán ha sido documentada desde la época prehispánica, cuando se talaron hasta 70000 ton/año de bosque para la construcción y mantenimiento de la zona

ceremonial (Barba-Pingarrón, 1995). Es de suponer que las modificaciones en la cubierta vegetal promueven cambios en la humedad del suelo que repercuten en los procesos pedogenéticos, cambiando la mineralogía magnética. En CGBE, esta humedad permite la alteración mineral de los ferromagnesianos, con la consecuente neoformación de óxidos de hierro. Aunque CGN tiene el mismo grado de evolución que CGBE, los cambios de vegetación y estabilidad (con aporte de materiales en esta posición de la ladera) influyen en el desarrollo del suelo y la distribución de los minerales magnéticos.

En MAS, los minerales magnéticos están dominados por Ti-magnetita/Ti-maghemita (y otros minerales paramagnéticos) con una distribución de tamaños de partícula heterogénea (MD-DS-SP) y un contenido ligeramente mayor de partículas DS dentro del horizonte Ap (Figura 6e). La relación Feo/Fed indica que Ap es el horizonte con la menor alteración pedogenética del perfil (Tabla 2). Cabadas-Báez (2004) señala que en este horizonte se presenta una incorporación de material alóctono, heterogéneo, el cual incluye suelos erosionados y redepositados. De acuerdo a sus parámetros magnéticos (Figura 10), MAS se ubica en una zona intermedia entre los perfiles de menor desarrollo (Fluvisoles) y los de moderado desarrollo (Cambisoles). Esto pareciera contradictorio con el grado de desarrollo que tienen los suelos, ya que MAS es aparentemente más antiguo que los Cambisoles, dada la edad del material subyacente, fechado en 13358 años cal AP (McClung de Tapia et al., 2005). Sin embargo, esta edad parece ser mucho más antigua que la del suelo. Al respecto, Pustavoitov (2010, comunicación personal) fechó los carbonatos contenidos en Bk y obtuvo una edad de 3900 años. La precipitación de los carbonatos ocurre en fases posteriores a la formación del horizonte B, por lo que se asume que la formación del suelo inicia antes. De acuerdo a los fechamientos de Sedov et al. (2009), se considera que la edad de un Fluvisol calcárico que conforma la cubierta edáfica en Tepexpan (a 15 km de la zona de estudio) es de 5395 años. Dada esta estimación, se puede suponer que la edad del Calcisol de Maseca es similar a la de los Cambisoles (6500 años).

Las diferencias en las propiedades magnéticas entre los Cambisoles y el Calcisol se deben a las condiciones ambientales marcadamente diferentes en cerro Gordo y Maseca, ya que en las mayores elevaciones son más húmedas y ligeramente más frías (Tabla 1). De hecho, los Calcisoles representan fases evolutivas diferentes a la de los Cambisoles, los cuales requieren de mayor humedad para la alteración de minerales primarios, en tanto que los Calcisoles se forman en regiones con mayor evapotranspiración. Aunque no se tienen datos concretos por la falta de las estaciones meteorológicas, la evapotranspiración en el fondo del valle es 1.3 veces más que la precipitación. A diferencia, en el cerro Gordo, Castilla y Tejero (1983) documentan mayor humedad causada por la presencia de mayor vegetación y el efecto de sombra que se tiene.

Los perfiles más jóvenes y de menor desarrollo (SNP y OTM) presentan características magnéticas similares. Ambos poseen bajas concentraciones de minerales magnéticos en los que dominan Ti-magnetita/Ti-maghemita con cantidades menores de hematita/goethita, que son aún menores en OTM (Figuras 10a y 10d), y mezclas de tamaños MD-DS-SP. La mayor diferencia entre ellos es el realce en χ en la superficie de OTM que está ausente en SNP, a pesar de ser suelos con pedogénesis similar, y en la distribución del contenido en partículas SP (Figura 10c). En SNP hay un aumento moderado de partículas SP en la parte superior (Figuras 7d), en tanto que en OTM el horizonte AB presenta un contenido alto de partículas SP, y muy alto en la parte superficial del horizonte Ap (Figura 8d).

La diferencia en el realce en χ entre los Fluvisoles OTM y SNP puede deberse al tipo de material que se aporta a cada suelo, ya que ambos son formados por procesos de aluvionamiento, es decir por incorporación de materiales aluviales, los cuales pueden transportar partículas de fuentes heterogéneas. Cabadas-Báez (2004), McClung de Tapia *et al.* (2003 y 2005), Solleiro-Rebolledo *et al.* (2006) y Rivera-Uria *et al.* (2007) reportan que estos perfiles muestran rasgos contrastantes. Por un lado, tienen minerales volcánicos poco alterados que revelan su bajo grado de desarrollo, con minerales caoliníticos de mayor intemperismo. Esto, aunado a la inversión en los fechamientos en SNP (Rivera-Uria *et al.*, 2007), permite suponer que hay aporte de restos de suelos, erosionados de las partes más altas. Cabadas-Báez (2004) y Solleiro-Rebolledo *et al.* (2006) documentan la presencia de paleosuelos formados en ambientes de mayor humedad (Luvisoles) en CGN y MAS, cuya señal magnética se ha mezclado con la observada en SNP. Este comportamiento diferencial de los suelos puede ayudar a las interpretaciones paleoambientales, ya que la influencia de la cantidad de humedad en los perfiles es importante para definir la alteración de los minerales volcánicos y por ende de la formación de hierro en el suelo y la dinámica de su mineralogía magnética.

La característica más notoria de CED es la menor concentración de minerales ferrimagnéticos de todos los perfiles analizados. Así mismo, este suelo presenta en el horizonte Ap un incremento tanto de minerales ferrimagnéticos como de antiferrimagnéticos. Al contrario de lo que sucede en CGBE, donde la presencia relativamente alta de minerales de alta coercitividad (hematita/goethita) queda enmascarada por la abundancia aún mayor de minerales ferrimagnéticos, en CED las bajas concentraciones de ferrimagnéticos permiten que los minerales antiferrimagnéticos resalten en S300. Como ya se ha mencionado, CED es un suelo cuyo comportamiento magnético es diferente al registrado en el resto de los suelos estudiados en el valle de Teotihuacán. Sin embargo, en un estudio preliminar, Solleiro-Rebolledo *et al.* (2011) señalan la presencia de un incremento notorio en χ en la parte inferior del perfil SNP, precisamente en la zona en la que se encuentra un paleosuelo de color oscuro con fuertes rasgos

vérticos. Este paleosuelo es análogo al perfil CED, el cual aparece en superficie a consecuencia de procesos de erosión que han eliminado los materiales superficiales, dejando sólo restos de un horizonte Ap. Es decir, Ah₁ y Ah₂ son horizontes de un paleovertisol formado hace aproximadamente 3000 años que ahora se encuentra casi en superficie, sólo sepultado por el horizonte Ap. Este horizonte Ap puede ser correlacionado con los Fluvisoles SNP y OTM. A diferencia de estos últimos, el paleosuelo muestra un mayor grado de desarrollo. Las propiedades vérticas (fracturamiento debido a los procesos de expansión y contracción estacionales) promueven la mezcla de materiales entre los horizontes, por lo que es de suponer que la heterogeneidad mostrada en los parámetros magnéticos se deba a estos procesos de argiloturbación continua.

6. Conclusiones

No obstante que las condiciones del clima regional y el tipo de material parental (materiales volcánicos andesítico-basálticos) son similares, los suelos presentan diversos estados de evolución como consecuencia de diferencias en otros factores de formación: relieve, edad y vegetación, así como cambios en el uso del suelo. Estas diferencias se ven reflejadas en sus propiedades magnéticas, a partir de las cuales es posible agrupar a los suelos de acuerdo con su grado de evolución y de las condiciones ambientales. 1) Suelos en etapas de evolución moderada: Cambisoles (CGBN y CGN) con mayor concentración magnética y mayor tamaño de partícula; y 2) suelos en etapas incipientes de evolución: Fluvisoles SNP y OTM, con bajas concentraciones y tamaño de partículas magnéticas más finas. Entre estos dos extremos se encuentra el suelo de mayor evolución, Calcisol MAS, en el que existe una correlación inversa entre la concentración y el contenido de partículas finas. Esto se debe a que su pedogénesis demuestra procesos relacionados a cambios estacionales marcados en el grado de humedad, lo que conlleva a la precipitación de carbonatos en el suelo, proceso ausente en los Cambisoles, ya que éstos están ubicados en posiciones de mayor altitud y humedad con buen drenaje.

Los suelos con desarrollo moderado (CGBE, CGN), con una edad estimada de 6500 años y a pesar de tener la misma etapa evolutiva, presentan diferencias en sus propiedades magnéticas. En CGBE, la densa cubierta vegetal, el mayor drenaje y rápido lixiviado en la parte superior favorecen el intemperismo de los minerales volcánicos primarios y la neoformación y acumulación de óxidos de hierro, magnetitas y hematitas/goethitas, en el horizonte Bw. La disminución de la concentración y de granos SP en la parte superficial puede relacionarse a la disolución e hidrólisis durante la descomposición de la materia orgánica, que actúa preferencialmente en granos finos, lo que resulta en un aumento neto en el tamaño de partícula magnética.

A diferencia de lo que sucede en las secuencias de

loess-paleosuelos que registran un aumento en χ en la parte superficial originado por la neoformación de partículas SP a DS, en CGN el realce en la concentración coincide con un aumento en el tamaño de partícula. La deforestación y la cultivación en la ladera donde se encuentra CGN ocasionan cambios en los regímenes de humedad del suelo y promueven la erosión de sus partículas y el redépósito de materiales erosionados de la parte superior. Por lo tanto, se considera que en CGN el incremento en la concentración de minerales magnéticos se debe a la incorporación de material alóctono grueso y no a la neoformación de finos. Las condiciones ambientales marcadamente diferentes en cerro Gordo y Maseca controlan las diferencias en las propiedades magnéticas entre los contemporáneos Cambisoles y el Calcisol, ya que los Cambisoles requieren de mayor humedad para la alteración de minerales primarios, en tanto que los Calcisoles se forman en regiones con mayor evapotranspiración.

Los perfiles más jóvenes y de menor desarrollo, los Fluvisoles SNP y OTM, poseen bajas concentraciones de minerales magnéticos en donde dominan las partículas gruesas. Una diferencia importante observada entre OTM y SNP es la ausencia del realce en χ en SNP, a pesar de ser suelos con pedogénesis similar. La diferencia puede deberse al tipo de material que se aporta a cada suelo, ya que ambos son formados por la incorporación de materiales aluviales con partículas de características heterogéneas. El perfil CED representa un caso particular de los suelos del valle de Teotihuacán, cuyas propiedades magnéticas difieren considerablemente de las encontradas en el resto. Dado que se trata de un paleosuelo formado hace aproximadamente 3000 años atrás (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2011), dichas propiedades son producto de condiciones ambientales diferentes a las que se presentan hoy en día en la región. Si bien existe un realce en la concentración de minerales magnéticos en el horizonte superficial, la ausencia de minerales de tamaño SP así como sus propiedades vérticas, indican que el agrietamiento y la mezcla de materiales –y no la pedogénesis– son responsables de este comportamiento

En síntesis, las propiedades magnéticas de los suelos de Teotihuacán varían de acuerdo a su grado de evolución y gradiente de humedad, semejante a lo reportado en una climosecuencia de las pampas argentinas (Bartel *et al.*, 2011). Los análisis aquí presentados muestran el potencial de los estudios de propiedades magnéticas de suelos, utilizando no sólo la χ , sino la combinación de varios parámetros de remanencias magnéticas y otros indicadores pedogenéticos, en la reconstrucción de las condiciones ambientales del pasado.

Agradecimientos

Los resultados que se presentan en este documento forman parte del trabajo de investigación doctoral de J. Rivas, quien gozó de una beca otorgada por CONACYT. Esta

investigación es parte de los proyectos PAPIIT IN112205 y CONACYT 43746-1. Se agradece la colaboración de H. Cabadas, C. Jasso, J. Gama, Y. Rivera, A. González, G. Vázquez, G. Rivas, H. Reyes, J. Barrientos, C. Borunda† y J.A. González, por el apoyo brindado en el trabajo de campo, laboratorio, interpretación de los datos y elaboración de figuras. Los autores agradecen a la Dra. A.A. Bartel y el Dr. M.A.E. Chaparro por sus valiosas observaciones y sugerencias que contribuyeron a mejorar este documento

Referencias

- Aragón, R., Buttrey, D.J., Shepherd, J.P., Honig, J.M., 1985, Influence of nonstoichiometry on the Verwey transition: *Physical Review B*, 31, 430-436.
- Barba-Pingarrón, L.A., 1995, El impacto humano en la paleogeografía de Teotihuacán: Cd. de México, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado, 79 p.
- Bartel, A.A., Bidegain, J.C., Sinito, A.M., 2011, Magnetic parameter analysis of a climosequence of soils in the southern Pampean Region, *Argentina: Geofísica Internacional*, 50, 9-22.
- Bidegain, J.C., Rico, Y., Chaparro, M.A.E., Jurado, S., 2009, Magnetic parameters reflecting pedogenesis in Pleistocene loess deposits of Argentina: *Quaternary International*, 209, 175-186.
- Cabadas-Báez, H.V., 2004, Paleosuelos como indicadores de cambio ambiental en el Cuaternario superior: El caso del valle de Teotihuacán: Cd. de México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura, 167 p.
- Cabadas-Báez, H.V., 2007, Paleosuelos del centro de México como indicadores de cambios ambientales ocurridos durante los últimos 30000 años: Cd. de México, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 168 p.
- Castilla, M.E., Tejero, J.D., 1983, Estudio florístico del cerro Gordo (próximo a San Juan Teotihuacán) y regiones aledañas: Cd. de México, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura, 128 p.
- Chaparro, M.A.E., 2006, Estudio de parámetros magnéticos de distintos ambientes relativamente contaminados en Argentina y Antártida: Cd. de México, Instituto de Geofísica, UNAM, 107 p.
- Collinson, D. W., 1983, *Methods in Rock Magnetism and Palaeomagnetism: Techniques and Instrumentation*: Londres, Chapman and Hall, 503 p.
- Dearing, J.A., 1994, *Environmental Magnetic Susceptibility: Using the Bartington MS2 System*: Lincoln, Reino Unido, Chi Publishing, 111 p.
- Dearing, J.A., Bird, P.M., Dann R.J.L., Benjamin S.F., 1997, Secondary ferrimagnetic minerals in Welsh soils: a comparison of mineral magnetic detection methods and implications for mineral formation: *Geophysical Journal International*, 130, 727-736.
- Dunlop, D., Özdemir, Ö., 1997, *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*: Nueva York, Cambridge University Press, 573 p.
- Gama-Castro, J., McClung de Tapia, E., Solleiro-Rebolledo, E., Ibarra, E., Sedov, S., Jasso-Castañeda, C., Vallejo-Gómez, E., Pi-Puig, T., Cabadas-Báez, H., 2005a, Incorporation of ethnopedological knowledge in the study of soils in the Teotihuacan valley, Mexico: *Eurasian Soil Science*, 38, 95-98.
- Gama-Castro, J.E., Solleiro-Rebolledo, E., McClung E., Villalpando, J.L., Sedov, S., Jasso-Castañeda, C., Palacios-Magorya, S., Hernández, D., 2005b, Contribuciones de la ciencia del suelo a la investigación arqueológica: El caso de Teotihuacán: *Terra Latinoamericana*, 23, 1-11.
- García, E., 1968, *Clima Actual de Teotihuacán: Materiales para Arqueología de Teotihuacán*: INAH, México, 9-28.
- García, E., 1988, *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen*: Universidad Nacional Autónoma de México, México, Instituto de Geografía, México, pp. 219.

- García-Palomo, A., Macías, J.L., Tolson, G., Valdez G., Mora J.C., 2002, Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, 41, 133-150.
- Geiss, C.E., Zanner C.W., 2006, How abundant is pedogenic magnetite? Abundance and grain size estimates for loessic soils based on rock magnetic analyses: *Journal of Geophysical Research*, 111, doi:10.1029/2006JB004564.
- Geiss, C.E., Zanner, C.W., 2007, Sediment magnetic signature of climate in modern loessic soils from the Great Plains: *Quaternary International*, 162/163, 97-110.
- Geiss, C.E., Zanner, W., Banerjee, S.K., Joanna, M., 2004, Signature of magnetic enhancement in a loessic soil in Nebraska, United States of America: *Earth and Planetary Science Letters*, 228, 355-367.
- Geiss, C.E., Egli, R., Zanner, C.W., 2008, Direct Estimates of Pedogenic Magnetite as a Tool to Reconstruct Past Climates From Buried Soils: *Journal of Geophysical Research*, 113, doi:10.1029/2008JB005669.
- Grimley, D.A., Vepraskas, M.J., 2000, Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils: *Soil Science Society of America Journal*, 64, 2174-2180.
- Grimley, D.A., Arruda, N.K., Bramstedt, M.W., 2004, Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA: *Catena*, 58, 183-213.
- Han, J., Lu, H., Wu, N., Guo, Z., 1996, The Magnetic Susceptibility of Modern soils in China and its Use for Paleoclimate Reconstructions: *Studia Geophysica et Geodetica* 40, 262-275.
- Heller, F., Evans, M. E., 1995, Loess magnetism: Review of Geophysics, 33, 211-240.
- Hunt, C.P., Banerjee, S.K., Han, J., Solheid, P.A., Oaches, E., Sun, W., Liu, T., 1995, Rock-magnetic proxies of climate change in the loess-paleosol sequences of the western Loess Plateau of China: *Geophysical Journal International*, 123, 232-244.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1999, Carta Edafológica Texcoco E14B21, 1:50000: Ciudad de México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Jordanova, N., Kovacheva, M., Hedley, I., Kostadinova, M., 2003, On the suitability of baked clay for archaeomagnetic studies as deduced from detailed rock-magnetic studies: *Geophysical Journal International*, 153, 146-158.
- Jordanova, N., Kovacheva, M., Kostadinova, M., 2004, Archaeomagnetic investigation and dating of Neolithic archaeological site (Kovachevo) from Bulgaria: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 147, 89-102.
- Liu, Q., Deng, Ch., Torrent, J., Zhu, R., 2007, Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess: *Quaternary Science Review*, 26, 368-385.
- Liu, Q., Hu, P., Torrent, J., Barrón, V., Zhao, X., Jiang, Z., Su, Y., 2010, Environmental magnetic study of a Xeralf chronosequence in northwestern Spain: Indicators for Pedogenesis: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 293, 144-156.
- Lounejeva Baturina, E., Morales Puente, P., Cabadas Báez, H.V., Cienfuegos Alvarado, E., Sedov, S., Vallejo Gómez, E., Solleiro Rebolledo, E., 2007a, Late Pleistocene to Holocene environmental changes from $\delta^{13}\text{C}$ determinations in soils at Teotihuacan, Mexico: *Geofísica Internacional*, 45, 85-98.
- Lounejeva Baturina, E., Morales Puente, P., Cienfuegos Alvarado, E., Sedov, S., Solleiro Rebolledo, E., 2007b, Late Quaternary environment in the Teotihuacan Valley, Mexico, inferred from $\delta^{13}\text{C}$ in soils: *Society for Archaeological Sciences Bulletin*, 30, 6-11.
- Lu, S.G., Xue, Q.F., Zhu, L., Yu, J.Y., 2008, Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China: *Catena*, 73, 23-33.
- Lugo Hubp, J., 1984, Geomorfología del Sur de la Cuenca de México: Cd. de México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 95 p.
- Maher, B.A., 1986, Characterisation of soils by mineral magnetic measurements: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42, 76-92.
- Maher, B.A., 1998, Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleoecology*, 137, 25-54.
- Maher, B.A., Thompson, R., Zhou, L.P., 1994, Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian paleomonsoon: A new mineral magnetic approach: *Earth and Planetary Science Letters*, 125, 461-471.
- Maher, B.A., Alekseev, A., Alekseeva, T., 2002, Variation of soil magnetism across the Russian steppe: its significance for use of soil magnetism as a palaeorainfall proxy: *Quaternary Science Reviews*, 21, 1571-1576.
- McClung de Tapia, E., Solleiro-Rebolledo, E., Gama-Castro, J., Villalpando, J.L., Sedov, S., 2003, Paleosols in the Teotihuacan valley, Mexico: Evidence for paleoenvironment and human impact: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20, 270-282.
- McClung de Tapia, E., Dominguez-Rubio, I., Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., 2005, Radiocarbon dates from soil profiles in the Teotihuacan valley, Mexico: Indicators of Geomorphological Processes: *Radiocarbon*, 47, 159-175.
- Miyahara, Y., 1972, Impurity effects on the transition temperature of magnetite: *Journal of the Physical Society of Japan*, 32, 629-634.
- Morin, F.J., Moskowitz, B.M., Franke, R.B.I., 1950, Magnetic susceptibility of $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ and $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$ with added titanium: *Physical Review*, 78, 819-820.
- Mullins, C.E., 1977, Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science – a review: *Journal of Soil Science*, 28, 223-246.
- Munsell Soil Charts, 2000, Macbeth Division of Kollmorgen.
- Nawrocki, J., Wójcik, A., Bogucki, A., 1996, The magnetic susceptibility record in the Polish and western Ukrainian loess-paleosol sequences conditioned by paleoclimate: *Boreas* 25, 161-169.
- Oaches, E.A., Banerjee, S.K., 1996, Rock-magnetic proxies of climate change from loess-paleosol sediments of the Czech Republic: *Studia Geophysica et Geodetica*, 40, 287-300.
- Opdyke, N.D., Channell, J.E.T., 1996, *Magnetic Stratigraphy*: San Diego, California, Academic Press, 346 p.
- Orgeira, M.J., Walther, A.M., Vázquez, C.A., Di Tommaso, I., Alonso, S., Sherwood, G., Yuguan, H., Vilas, J.F.A., 1998, Mineral magnetic record of paleoclimate variation in loess and paleosol from the Buenos Aires formation (Buenos Aires, Argentina): *Journal of South American Earth Sciences*, 11, 561-570.
- Orgeira, M.J., Walther, A.M., Tofalo, R.O., Vázquez, C., Berquo, T., Favier Dobois, C., Bonhel, H., 2003, Environmental magnetism in fluvial and loessic Holocene sediments and paleosols from the Chacopampean plain (Argentina): *Journal of South American Earth Sciences*, 16, 259-274.
- Orgeira, M.J., Pereyra, F.X., Vázquez, C., Castañeda, E., Compagnucci, R., 2008, Rock magnetism in modern soils, Buenos Aires Province, Argentina: *Journal of South American Earth Sciences*, 26, 217-224.
- Ortega-Guerrero, B., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Soler, A., 2004, Magnetic mineralogy in Barranca Tlalpan exposure paleosols, Tlaxcala, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21, 120-132.
- Özdemir, Ö., Dunlop, D.J., 1996, Thermoremanence and Néel temperature of goethite: *Geophysical Research Letters*, 23, 921-924.
- Özdemir, Ö., Dunlop, D.J., Moskowitz B.M., 1993, The effect of oxidation on the Verwey transition in magnetite: *Geophysical Research Letters*, 20, 1671-1674.
- Porter, S.C., Hallet, B., Wu, X., An, Z., 2001, Dependence of near surface magnetic susceptibility on dust accumulation rate and precipitation on the Chinese Loess Plateau: *Quaternary Research*, 55, 271-283.
- Rivas-Ortiz, J.F., 2003, Propiedades magnéticas de paleosuelos cuaternarios del Nevado de Toluca y su aplicación en la reconstrucción paleoambiental: Cd. de México, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura, 91 p.
- Rivas-Ortiz, J.F., 2006, Análisis de magnetismo de rocas en paleosuelos pleistocénicos de origen volcánico y eólico, como una herramienta alterna en la interpretación paleoambiental: Cd. de México, México, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 154 p.

- Rivas-Ortiz, J., Ortega, B., Sedov, S., Solleiro, E., Sycheva, S., 2006, Rock magnetism and pedogenetic processes in Luvisol profiles: Examples From central Russia and central Mexico: *Quaternary International*, 156/157, 212-223.
- Rivera-Uria, Y., 2008, Impacto del desarrollo cultural prehispánico en la cubierta edáfica del valle de Teotihuacán: Cd. de México, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 124 p.
- Rivera-Uria, M.Y., Sedov S., Solleiro-Rebolledo, E., Pérez-Pérez, J., McClung de Tapia, E., González, A., González, A., Gama-Castro, J., 2007, Degradación ambiental en el valle Teotihuacan: evidencias geológicas y paleopedológicas: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59, 203-217.
- Schellenberger, A., Heller, F., Veit, H., 2003, Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the Las Carreras loess-paleosol sequence in Valle de Tafí, Tucumán, NW-Argentina: *Quaternary International*, 106/107, 159-167.
- Sedov, S., Lozano-García, S., Solleiro-Rebolledo, E., McClung de Tapia, E., Ortega-Guerrero, B., Sosa-Nájera, S., 2009, Tepexpan revisited: A multiple proxy of local environmental changes in relation to human occupation from a paleolake shore section in Central Mexico: *Geomorphology*, 122, 309-322.
- Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., McClung de Tapia, E., Cabadas-Báez, H., Gama-Castro, J., Vallejo-Gómez, E., 2006, Spatial variability of environment change in the Teotihuacan Valley during the Late Quaternary: Paleopedological inferences: *Quaternary International*, 156/157, 13-31.
- Solleiro-Rebolledo, E., Sycheva, S., Sedov, S., McClung de Tapia, E., Rivera-Uria, Y., Salcido-Berkovich, C., Kuznetsova, A., 2011, Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, México: Responses to late Quaternary environmental changes: *Quaternary International*, 233, 40-52.
- Tarling, D.H., 1983, *Palaeomagnetism: Principles and Applications in Geology, Geophysics and Archeology*: Londres, Chapman and Hall, 379 p.
- Terhorst, B., Appel, E., Werner, A., 2001, Palaeopedology and magnetic susceptibility of a loess-palaeosol sequence in southwest Germany: *Quaternary International*, 76/77, 231-240.
- Thompson, R., Oldfield F., 1986, *Environmental Magnetism*: Londres, Allen & Unwin, 227 p.
- Tite, M.S., Linington, R.E., 1975, Effect of climate on the magnetic susceptibility of soils: *Nature*, 256, 565-566.
- Vásquez, C., Walther, A.M., Orgeira, M.J, Di Tommaso, I.M., Lippai, H., Alonso, S., Vilas, J.F.A., 1998, Magnetismo de rocas y su aplicación a paleosuelos: estudio piloto en una secuencia loess-paleosuelo de la región chacopampeana: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 53, 83-90.
- Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palamera, R., 1989, Geología de la cuenca de México: *Geofísica Internacional*, 28, 133-189.
- Verosub, K.L., Fine, P., Singer M.J., TenPas, J., 1993, Pedogenesis and paleoclimate: Interpretation of the magnetic susceptibility record of the Chinese loess-paleosol sequences: *Geology*, 21, 1011-1014.
- World Reference Base for Soil Resources (WRB), 2006, *World Reference Base for Soil Resources 2006 (World Soil Resources Reports No. 103)*: Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 132 p.

Manuscrito recibido: Junio 15, 2011

Manuscrito corregido recibido: Noviembre 11, 2011

Manuscrito aceptado: Diciembre 1, 2011

APENDICES

"El futuro depende, en gran parte, de la familia, lleva consigo el porvenir mismo de la sociedad; su papel especialísimo es el de contribuir eficazmente a un futuro de paz".

Juan Pablo II

Capítulo 10

10 Apéndices

En este apartado, se presentan brevemente algunos conceptos y bases teóricas que contribuyen a la interpretación de los datos obtenidos en este estudio.

Apéndice 10A

(Interpretación de parámetros magnéticos)

10 A.1 Parámetros de composición

El análisis de las curvas de susceptibilidad magnética *versus* temperatura ambiente (κ vs T), así como las de adquisición de IRM son utilizadas como un registro para inferir la composición de la mineralogía magnética. Diversos autores como *Tarling (1983)*, *O'Really (1984)* y *Dunlop y Özdemir (1997)* han establecido varios intervalos de temperatura asociada con los puntos de Curie (T_C , temperatura a partir de la cual un material ferromagnético se comporta como paramagnético), y/o temperatura de Neel (T_N , análoga a T_C , en que un material antiferrimagnético se comporta como paramagnético). Ambas temperaturas son características para algunos de los minerales magnéticos como resultado de su composición y alteración (**Figura 42**). De ésta forma, se ha reportado que para la goethita (Gth) el rango de temperaturas oscila entre 80 - 250 °C (*Ozdemir y Dunlop, 2000; Kasama et al., 2004; Gilbert et al., 2008*), mientras que entre 650-725°C corresponde con la hematita (Hm) de acuerdo con los trabajos de *Collinson (1983)*, *Tarling (1983)*, Peters y Thompson (1998). Otros autores reportan temperaturas entre 153-578 °C para la Titanomagnetita, Ti(Mg), (*Collinson, 1983; Dunlop y Özdemir, 1997*), e intervalos entre 218 °C – 675 °C para la Titanohematita, Ti(Hm), (*Opdyke y Chanell, 1996; Dunlop y Özdemir, 1997*) y 350 °C (*Tarling, 1983; O'Really, 1984*).

La diferencia entre las curvas de calentamiento y la de enfriamiento de los experimentos κ vs T (*reversibilidad*) permite inferir la composición de las partículas magnéticas del suelo (**Figura 43**), y pueden también ser un registro de la estabilidad termal de los minerales magnéticos (*Deng et al., 2004; Zhao y Liu, 2010*). La ausencia de un aumento en las curvas de susceptibilidad con la temperatura, próximo a T_C (efecto de Hopkinson) se ha asociado frecuentemente con la neoformación de partículas magnéticas (*Morales, 1995; Zhao y Liu, 2010*).

El origen no reversible de una curva k vs T puede ser ocasionado por un aumento en la transformación de los minerales magnéticos, donde la irreversibilidad de éstas curvas puede interpretarse como un registro de la presencia de partículas paramagnéticas en la muestra (**Carracho y Villalain, 2011**), ó como una analogía de la pedogénesis del suelo especialmente durante el proceso de calentamiento (**Geiss, 1999; Zhao y Liu, 2010**). Por el contrario, un decremento curva en este tipo de experimentos con un comportamiento reversible, se ha asociado con una disminución en el intemperismo y/o la conversión de Mgh metaestable a Hm (**Deng et al., 2004**), mientras que un incremento a bajas temperaturas señala la presencia de partículas SP. También se ha interpretado como un indicador de la presencia de partículas antiferrimagnéticas, Gth p.ej., mismas que son más sensibles a estas temperaturas (**Zhao y Liu, 2010**). Por otro lado, la pendiente que se registran en las curvas de adquisición de IRM se utiliza frecuentemente como un registro complementario que permite inferir la composición de la mineralogía magnética a partir de sus coercitividades (**Opdyke y Channell, 1996; Peters y Thompson, 1998; McElhinny y McFadden, 2000; Maher, 2004**).

En trabajos previos se reporta que las curvas que saturan rápidamente a campos bajos ($H < 300\text{mT}$) se debe al contenido de partículas magnéticas suaves y/o de baja coercitividad $T_i(\text{Mg})$. T_i , p.ej., mientras que las curvas que saturan a campos más altos ($300\text{mT} < H$) con una pendiente suave y coercitividades más altas sugieren la presencia de Hm (**Thompson y Oldfield, 1986; De Boer et al., 2001**). Para curvas de adquisición que comienzan a saturarse en campos bajos, con un incremento parcial entre 100-300mT aprox., y una tendencia a saturarse posteriormente, han sido también interpretadas anteriormente como una mezcla de partículas ferrimagnéticas de alta y baja coercitividad (**France y Oldfield, 2000; Jordanova et al., 2011**) y/ó la presencia de Ferr (**Maher, 2004**). De acuerdo con Maher y colaboradores (**2004**), las curvas que saturan a campos bajos, pero que tienden a incrementarse abruptamente y sin alcanzar una clara saturación son un registro de la existencia de Gth.

La forma de los ciclos de histéresis (estabilidad y cuadratura) son utilizados como fuente de información que permite inferir información sobre la composición en función de la coercitividad, así como del dominio magnético de la muestra (**Maher y Thompson, 1999; Opdyke y Channell, 1996**). Baja estabilidad y alta cuadratura se asocian con Hm, con forma de avispa, se interpretan como la mezcla de coercitividades.

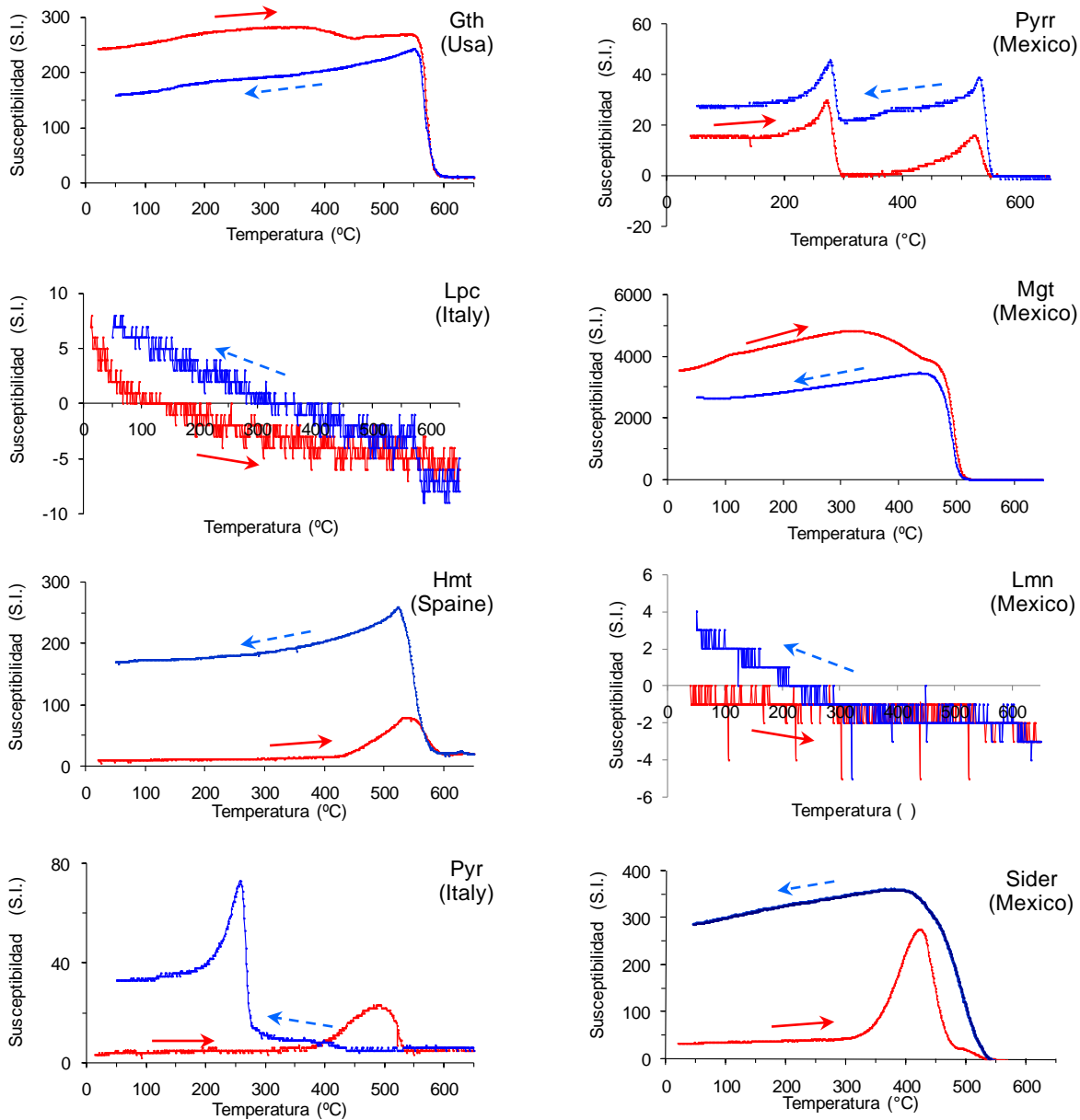


Figura 43.- Esquema representativo de algunos procesos de formación de los principales minerales magnéticos y ejemplos de sus curvas de k vs. T . El diagrama muestra algunas de las transformaciones de los minerales magnéticos (a). Ejemplos de curvas k vs T a temperatura ambiente de minerales magnéticos para muestras de mano (b) que contienen: Goethita (Gth), Pirrotita (Pyrr), Hematita (Hmt), Lepidocrocita (Lpc), Magnetita (Mgt), Pirita (Pyr). Gráficos de k vs T de muestras de rocas, suelos y productos volcanoclásticos (c). Basalto (BAS), Bomba (BOM), Flujo pirocástico (FPC), Suelo a partir de roca ígnea básica (SRIB), suelo de origen volcánico (SV). En color rojo (flecha continua a la derecha) representa la etapa de calentamiento, mientras que en color azul (flecha discontinua a la izquierda) se muestra el proceso de enfriamiento. El diagrama (a) se construye con datos e información tomados de trabajos previos (*Paquet y Clauer, 2012; Gribbley, %%%%; Dana, %%%%; Acevedo et al., 2004; Dekkers, 1989*; entre otros).

Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de la Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México

Jorge F. Rivas Ortiz

Capítulo 11:
Apéndices

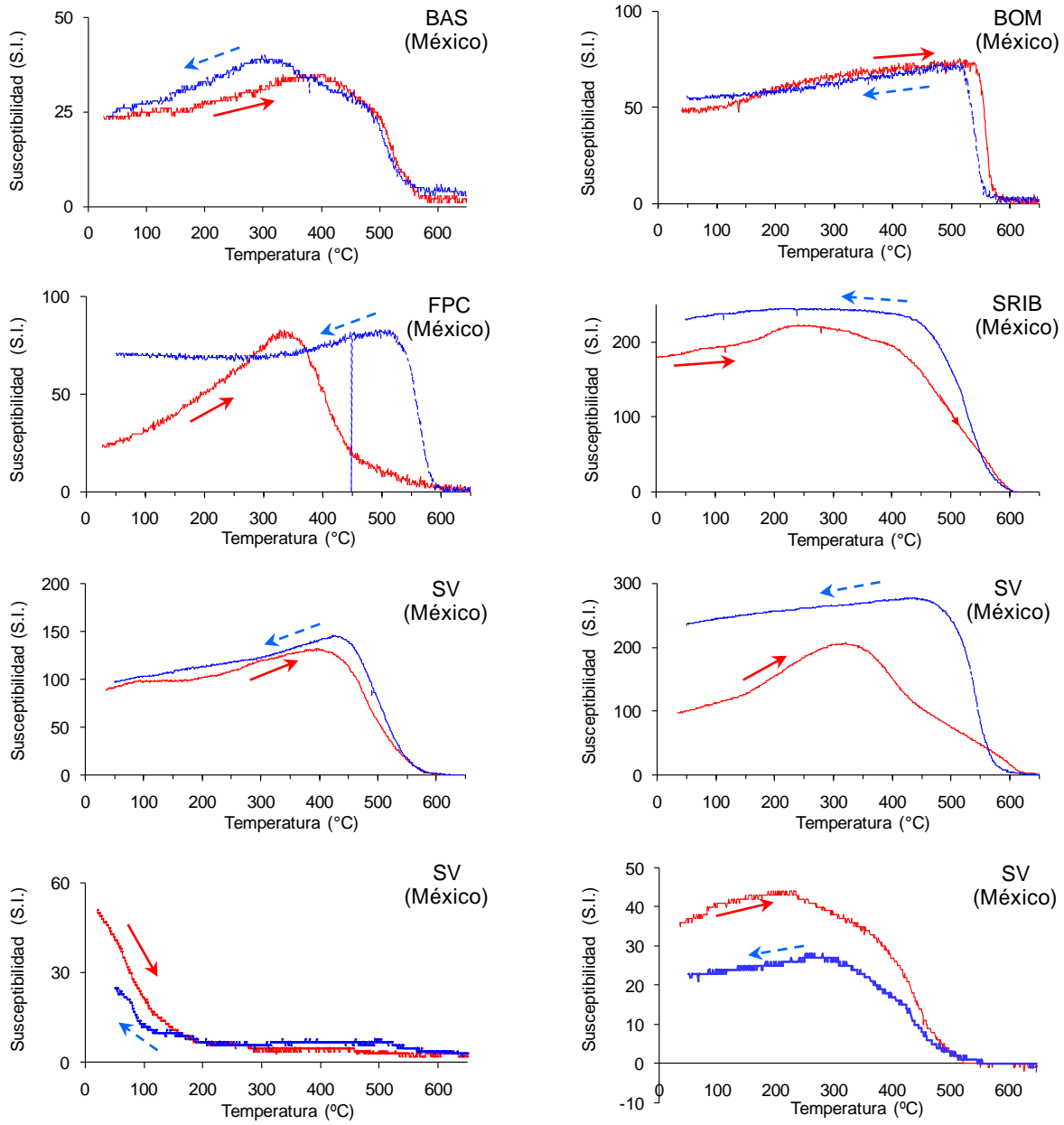


Figura 43 (Continuación).-

10A.2 Parámetros de concentración

Los parámetros χ , χ_h , ARM y $SIRM_{IT}$ son interpretados como registros de la concentración de las partículas magnéticas. La susceptibilidad magnética (χ) es un indicador de la abundancia de partículas principalmente ferrimagnéticas y antiferrimagnéticas imperfectas, mismas que aumentan en proporción directa con el tamaño de grano (*Dunlop, 1986; Maher, 1988; Maher y Thompson, 1999*). De acuerdo con Tauxe (2010) es fuertemente influenciada por la presencia de Mg, mientras que diversos autores establecen su relación directa con diversos factores como la precipitación (Balsam et al., 2011; *Liu et al., 2012; Liu et al., 2014*), temperatura (*Han et al., 1996*), tiempo (*Maher y Thompson, 1999*), el contenido de M.O. (*Ji et al., 1997*), y/o de $CaCO_3$ (*Maher, 1998; De Jong et al., 2000*).

La susceptibilidad en altas frecuencias χ_h es un indicador del contenido de partículas paramagnéticas (valores altos) ó diamagnéticas (valores bajos) así como registro de partículas SD (Dunlop y Ozdemir, 1997; *Geiss, 1999; Lagroix, 2004; Geiss y Zanner, 2006*).

Los parámetros ARM y $SIRM_{IT}$ son más sensibles a las partículas ferrimagnéticas (*Thompson y Oldfield, 1986*). De acuerdo con Spassov y colaboradores (2003) éstos son influenciados por el tamaño de grano (PSD y MD) aumentando de manera inversa éste último ($SIRM_{IT}$) con el tamaño de grano (*Thompson y Oldfield, 1986*), aunque de acuerdo con Maher (1988) ésta última también puede ser un registro de granos SSD y PSD. La ARM en ocasiones se considera que presenta un comportamiento magnéticamente duro (*Maher, 1988; Bogalo, 1999*), y es influenciado por la presencia de granos SD (*Hunt et al., 1995; Dunlop y Ozdemir, 1997; Egli y Lowrie, 2002*) ó PSD (*Banerjee et al., 1981 King et al., 1982*). Varios autores han establecido que este parámetro magnético es independiente del contenido de para y diamagnéticos (*Stacey y Banerjee, 1974; King et al., 1982; Maher, 1988*).

Los ciclos de histéresis son de utilidad ya que a partir de estos se puede estimar cuantitativamente la contribución ferrimagnética y paramagnética (*Tauxe, 2010 p.ej.*). También permiten, por medio de los cocientes entre remanencias y coercitividades, establecer los diagramas de Day que sirven para inferir la distribución y contribución de los dominios magnéticos de una partícula (*Day et al., 1977; Dunlop, 2002; Tauxe et al., 2002*).

10.A.3 Parámetros de dominio magnético

Los cocientes como $SIRM_{IT}/\chi$, $\chi_{fd\%}$, ARM/IRM_{100} , χ_{ARM} , están asociados con la distribución de los dominios de las partículas magnéticas (*Thompson y Oldfield, 1986; Dearing, 1999*). El

cociente $SIRM_{1T}/\chi$ es sensible al contenido de las partículas ferrimagnéticas y/o paramagnéticas así como a la distribución de partículas ultrafinas de dominio superparamagnético (SP) y/o gruesas, MD (*Thompson y Oldfield, 1986; Peters y Thompson, 1998*), aunque también puede ser influenciado por la composición de las partículas magnéticas (*Thompson y Oldfield, 1986; Evans y Heller, 2003*). Diversos reportes establecen que los valores bajos en este cociente señalan una mayor presencia de partículas paramagnéticas, granos SP y/o MD, mientras que curvas con valores homogéneos indican mezclas de granos (SP + SD) ~ MD. Los valores altos se interpretan como un registro del contenido de partículas ferrimagnéticas SD y/o minerales antiferrimagnéticos como Gth y/o Hm dentro de las muestras (*Thompson y Edwards, 1982; Thompson y Oldfield, 1986; Stoner, et al., 1996*).

El parámetro $\chi_{fd\%}$ es un indicador de partículas de dominio superparamagnético (SP), ($<0.03\mu\text{m}$), próximos al límite SP~SP/SD, y su comportamiento es influenciado por la viscosidad de las partículas magnéticas (*Liu et al., 2004*). Varios reportes han establecido que valores de $\chi_{fd\%} < 2\%$ reflejan el porcentaje mínimo requerido para detectar la abundancia de partículas SP ($< 10\%$) y un mayor contenido de MD, mientras que para valores de $\chi_{fd\%} > 5\%$ la muestra estaría controlada por SP (**Ref**). Valores de $\chi_{fd\%} = 8\%$ indica un contenido SP $> 75\%$, y $\chi_{fd\%} = 10-14\%$ sugieren la predominancia partículas SP (*Dearing, 1999; Dearing et al., 1996 y 1997*). Un incremento registrado en éste parámetro puede estar asociado con la presencia de granos diamagnéticos y/o un mayor grado de anisotropía (*Dearing, 1999*). Jordanova y colaboradores (*2008*) reportan que valores de $\chi_{fd\%}$ entre el 8-15% se deben a un aumento de granos SP debido a la naturaleza e influencia de la pedogénesis en el suelo. De acuerdo con Lu Shenggao y colaboradores (*2008*), $\chi_{fd\%} < 3$ abundan los granos MD, $\chi_{fd\%} = 3-5\%$ corresponden con mezclas de SP+MD, y $5 < \chi_{fd\%}$ indica la presencia significativa de SP.

Por otro lado, debido a que la ARM es sensible a las partículas SD, el cociente ARM/IRM_{100} indica la abundancia relativa de éstas partículas (*Hunt et al., 1995*). Geiss (*1999*) indica que los valores altos pueden señalar altas cantidades de granos SD ~ SD/PSD, valores bajos del cociente sugieren una relativa mayor cantidad de SP próximos al límite SP/SD respectivamente, mientras que valores moderados y constantes se asocian con partículas MD. De acuerdo con trabajos recientes, el parámetro $\chi_{ARM} = (ARM/50 \mu\text{Oe})$ registra principalmente la presencia de partículas SD/SSD (valores altos) y MD (valores bajos), así como la existencia de magnetita ($<0.2\mu\text{m}$), y no es influenciado por paramagnéticos (*Wang et al., 2010; Liu et al., 2012*).

10.A.4 Parámetros de dureza magnética

Los parámetros como H_{CR} , $HIRM_{300}$, S_{100} , y S_{300} , son interpretados como un registro de coercitividades. El parámetro H_{CR} es asociado con la coercitividad y/o el tamaño de las partículas magnéticas (*Dunlop y Ozdemir, 1997; Dunlop, 2002*). Trabajos previos (*Dunlop y Ozdemir, 1997; Sangode et al., 2008*) establecen que es un registro de partículas magnéticas suaves gruesas ($H_{CR} < 20\text{mT}$) a finas ($H_{CR} 20\text{-}50\text{ mT}$), así como el registro de granos duros ($H_{CR} > 50\text{mT}$) y/o ($H_{CR} > 300\text{mT}$) para partículas magnéticas gruesas y duras.

El parámetro $HIRM_{300}$ se asocia con la concentración (granos antiferrimagnéticos) y su relación entre partículas magnéticamente suaves y duras (*Thompson y Oldfield, 1986; Opdyke y Chanell, 1996; Geiss, et al., 2004*). De acuerdo con Bogalo (*1999*), $HIRM_{100}$ puede ser un sustituto de $HIRM_{300}$ para identificar la presencia de partículas magnéticamente suaves en los suelos (*Robinson, 1986; Bloemedal, 1988; Bloemedal et al., 1992; Opdyke y Chanell, 1996*), mientras Dearing y colaboradores (*1996*) determinan que el primero es más sensible para detectar la presencia de Hmt, mientras que el segundo lo es para Gth respectivamente (*Liu et al., 2013; Balsam et al., 2011*). Tauxe (*2004 y 2010*) utiliza éste parámetro como una herramienta con la cual determina la presencia de Hm y Ferr. De acuerdo con los autores, los valores altos que se registran en estos parámetros indican un mayor contenido de material magnético duro.

Los parámetros S_{100} y S_{300} son interpretados como una relación de las partículas magnéticas duras (*Stober y Thompson, 1979; Bloemedal, 1983; Thompson y Oldfield, 1986; Kruvier y Passier, 2001; Evans y Heller, 2003*), es decir, de las coercitividades. De acuerdo con Bloemedal y colaboradores (*1992 y 1993*), S_{300} es un indicador de partículas duras (altas coercitividades) sí el contenido total de éstas es del 80% del total de la muestra analizada.

Reportes como los de *Sangode y colaboradores (2008)* así como *Robinson, (1986)* han establecido previamente una zonación para éstos cocientes. Es decir, por ejemplo para el parámetro S_{100} , $0.70 < \text{ferrimagnéticos MD}$, $0.5\text{-}0.75 = \text{SD}$ ó PSD, óxidos férricos con predominio de antiferrimagnéticos $<< 0.5$; mientras que para S_{300} registra antiferrimagnéticos < 0.3 .

10.A.5 Parámetros no magnéticos

Por otro lado, el color del suelo es una propiedad que se ha utilizado como un registro de la evolución pedológica de un perfil (*Buntley y Westin, 1965; Hurst, 1977; Harden, 1982*), como criterio de clasificación (*Soil Survey Division Staff, 1999*) ó como una herramienta complementaria para realizar estimaciones semi-cualitativas de algunos minerales de hierro, estableciendo patrones de colores asociados con algunos de los principales minerales magnéticos como Gth/Lpc/Ferr, Hm, Mg, (**Tabla 4**) en estudios pedológicos (*Schwertmann y Fisher, 1973; Schwertmann, 1993; Michel et al., 2010*). También han sido de utilidad como fuente de información sobre el grado de intemperismo de perfiles pedológicos (*Torrent, 1980; Cornell y Schwertmann, 2003; Balsam et al., 2004*) y han aportado evidencias de diversos procesos pedológicos como la rubefacción (*Hurst, 1977; Liu, 1985; Ji et al., 2001*), hidratación/deshidratación, reducción (*Kampf y Schwertmann, 1983; Schwertmann, 1988*), entre otros. De ahí que esta propiedad del suelo se esté incorporando con mayor énfasis en los estudio de las propiedades magnéticas de éstos durante la última década (*Barron y Torrent, 2002; Lu Sh., et al., 2012*).

De forma análoga al color, propiedad física no-magnética del suelo, los índices de Feo/Fed y L/A pueden ser de utilidad para inferir información indirectamente sobre la mineralogía magnética, el estado de desarrollo del suelo y/o el intemperismo. Los valores altos de la relación Feo/Fe_d según *Malucelli et al., (1999)* representan una baja cristalinidad de los compuestos de hierro y un porcentaje alto de amorfos lo cual es diagnóstico de suelos que no han alcanzado una madurez evolutiva. De acuerdo con *Mizota y Van Reuwijk (1989)* los valores altos (>0.75) son característicos de suelos poco desarrollados, en tanto que los valores medios según *McKeague y Day (1966)* indican suelos con evolución que oscila de ligera a moderada. Los valores <0.15 solo se presentan en suelos muy intemperizados y evolucionados, como es el caso de algunos Nitosoles y Oxisoles.

En la relación limo/arcilla se considera como valores críticos a <0.15 y >2.0 (*Young, 1976; Van Wambeke, 1992*). El primer valor se asocia con suelos altamente intemperizados, bien desarrollados y generalmente muy antiguos, formados bajo condiciones de alta estabilidad del paisaje y también característico de zonas tropicales. En contraste, valores de 1, o ligeramente superiores, son diagnósticos de una alteración moderada, propia de zonas templadas. Los valores >2, generalmente son indicativos de un reducido intemperismo y una escasa evolución del suelo.

Apéndice 10B

(Conceptos de suelos)

Suelo

Es la capa superficial de la litosfera que posee fertilidad y vegetación, que está compuesta de varios horizontes paralelos a la superficie, con características impartidas por la interacción de los factores formadores de suelo, que a través de su interacción con los procesos pedogenéticos, son responsables de transformar la roca a partir de la cual se desarrolla el suelo. Éstos son responsables de modificar física, química y biológicamente a los horizontes para dar origen a la configuración final de un perfil pedológico, que con el tiempo evoluciona hasta perder las características y propiedades del material que le dio origen. Una secuencia teórica está compuesta, en general por horizontes A, B, y C, que se originan a partir de la transformación de compleja de la roca madre, posee una estructura sólida y porosa de composición heterogénea con diversos componentes mineralógicos y litológicos (*Buckman y Brady, 1977; Lugo et al., 1989, Buol et al., 2000*).

Horizonte

Es el resultado de la transformación ó modificación por efecto de los factores formadores que se encuentran dispuestos en posición paralela a la superficie del suelo. Los diferentes tipos de horizontes son el reflejo de las diversas condiciones a las que estuvo expuesto el suelo en su formación, aunque también pueden estar relacionados con la intensidad y duración de la pedogénesis (*Retallack, 1990; Tarbuck y Lutgens, 2000*). Los principales horizontes fundamentales que puede contener un suelo son: O, A, B, C, R

Horizonte O

Está formado por el mantillo orgánico derivado de plantas y animales depositados en la superficie mineral, con un espesor hasta de treinta y cinco centímetros aproximadamente, el cual varía dependiendo de las condiciones del sitio de estudio, y que es dominado por el material orgánico fresco ó parcialmente descompuesto.

Horizonte A

Es afectado por procesos eluviales (remoción de constituyentes de un horizonte del suelo, capa ó zona por solución ó lavado). Es el horizonte más superficial y llega hasta unos sesenta centímetros de espesor. Puede ser de color oscuro debido a su abundante contenido de humus

(material orgánico descompuesto), que constituyen la zona donde se encuentra la mayor parte de las plantas, formado por partículas muy finas de arenas y arcillas. En su parte inferior el agua penetra, provoca la separación de los compuestos coloides (partículas de 1-2 micras de diámetro ó menor) y del bióxido de carbono que emigra a los niveles inferiores, con lo que se da un proceso de lavado (lixiviación).

Horizonte B

Con procesos de iluviación (captación de materiales removidos por eluviación) se desarrolla debajo del horizonte A, y su espesor suele oscilar entre veinte y ochenta centímetros, llegando en ocasiones hasta un metro. Es considerado como un horizonte de acumulación mineral ó alteración, de color más claro (pardo/rojizo - amarillento) que por lo general es indicativo de la presencia de óxidos de hierro dentro del suelo. Además de contener todos los elementos coloidales que provienen del horizonte A, es también el más plástico y menos poroso.

Horizonte C

Considerado a menudo como el material parental del suelo, es el más profundo y constituye la transición a la roca madre ó generadora. Su espesor puede oscilar entre cincuenta centímetros hasta metros. Está constituido por cantos sueltos dentro de una matriz arcillosa-arenosa que van siendo más numerosas y de mayor tamaño hacia la zona profunda, en donde se ubica la roca fresca, que se encuentra relativamente poco afectado por los procesos pedogenéticos.

Horizonte R

Es considerado como la roca madre consolidada y subyacente, como el granito, arenisca ó caliza a partir de las cuales se formó el horizonte ó capa superior adyacente, que es diferente al material suprayacente.

Horizonte transición

Son horizontes que muestran una combinación de características propias que los conforman p.ej., AB, AC, BC. Los horizontes B y C pueden ser acompañados por subíndices que denotan el desarrollo de una característica predominante, como resultado de los procesos de formación. Por ejemplo, Gleyzación (g), Acumulación de humus (h), intemperismo (w), perturbación por cultivo ó pastoreo (p), presencia de cutanes de arcilla en el horizonte B (t), etc.

Factor formador del suelo

Son aspectos fundamentales que contribuyen a un mejor entendimiento de la génesis y desarrollo de un perfil pedológico, y de los procesos que marcan la secuencia y grado de alteración de los minerales primarios presentes en las rocas a partir de los cuales se forma el suelo. En el estudio del suelo, se considera que son cinco los principales factores: Clima, material parental, relieve, organismos y tiempo (*Dokuchaev, S.XIX, Jenny, 1941, Buol et al., 2000, entre otros*).

Proceso pedogenético

Son los que dan como resultado los diferentes tipos de suelo, en función de las características iniciales del estrato y las acciones que los elementos o la mano del hombre ejercen en él.

Pedogénesis

También conocido como edafogénesis, es el proceso a través del cual se forma y desarrolla un suelo. Algunos autores (<http://www.guiaambiental.com.ar/>) consideran que la secuencia de la pedogénesis comprende: a) desintegración física de las rocas expuestas, lo que provee el material parental, b) Colonización del material por organismos vivos, c) Acumulación consecuente de residuos orgánicos en y debajo de la superficie, desarrollo del horizonte A, d) Erosión química continua (descomposición y recomposición). Ésta puede producir arcilla, algunas de las arcillas migran hacia abajo con otros materiales transportables, como sales, y se acumulan en una zona intermedia (B) entre la zona de mayor actividad biológica (A) y el material parental más profundo (C). En este último paso de la secuencia implica eluviación (“washing out”) e iluviación (“washing in”; arcillas y otras sustancias emigran de A (Horizonte eluvial) y se acumulan en B (Horizonte iluvial). El perfil se va profundizando a medida que la parte superior de C se transforma, hasta llegar a un equilibrio entre formación de suelo y erosión.

Evolución pedológica

La continua transformación física, química y biológica de los horizontes del suelo que modifican la configuración e sus horizontes del suelo y sus componentes durante el tiempo como resultado de su pedogénesis (interacción de factores formadores de suelo-procesos pedogenéticos), y que da lugar a diversas etapas de desarrollo, misma que a medida aumenta, conserva menos las propiedades del material que le da origen al perfil pedológico.

Regosol

El término Regosol deriva del vocablo griego "rhegos" que significa sábana, haciendo alusión al manto de alteración que cubre la tierra. Son suelos que se desarrollan sobre materiales no consolidados, alterados y de textura fina. Frecuentemente muestran perfiles con una secuencia de horizontes del tipo A-C. No poseen un horizonte de diagnóstico, excepto un ócrico superficial. La evolución del perfil es mínima como consecuencia de su juventud, o de un lento proceso de formación por una prolongada sequedad. En general, se les asocia con cualquier zona climática, sin permafrost, a altitudes variadas. Los Regosoles son muy comunes en zonas áridas, en los trópicos secos y en las regiones montañosas.

Fluvisol

El término Fluvisol deriva del vocablo latino "fluvius" que significa río, haciendo alusión a que estos suelos están desarrollados sobre depósitos aluviales. Son suelos que se desarrollan a partir de depósitos, predominantemente recientes, de origen fluvial, lacustre ó marino. Presentan una secuencia de horizontes tipo AC con evidentes muestras de estratificación que dificultan la diferenciación de los horizontes, aunque es frecuente la presencia de un horizonte Ah muy conspicuo. Los rasgos redoximórficos son frecuentes, sobre todo en la parte baja del perfil. Se les suele ubicar en áreas periódicamente inundadas, a menos que estén protegidas por diques, de llanuras aluviales, abanicos fluviales y valles pantanosos. Aparecen sobre todos los continentes y cualquier zona climática.

Cambisol

El término Cambisol deriva del vocablo latino "cambiare" que significa cambiar, haciendo alusión al principio de diferenciación de horizontes manifestado por cambios en el color, la estructura o el lavado de carbonatos, entre otros. Son perfiles que se desarrollan sobre materiales de alteración procedentes de una amplia gama de rocas, destacando aquellos depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial. Presentan una secuencia de horizontes de tipo ABC, en donde el horizonte B suele caracterizarse por tener una débil a moderada alteración del material original, debido a la ausencia de cantidades apreciables de arcilla, materia orgánica, compuestos de hierro y aluminio de origen iluvial. Suelen desarrollarse sobre todas las morfologías, climas y tipos de vegetación.

Andosol

El término andosol deriva de los vocablos japoneses "an" que significa negro y "do" que significa suelo, haciendo alusión a su carácter de suelos negros de formaciones volcánicas. Se desarrollan fundamentalmente a partir de cenizas volcánicas, pero también pueden aparecer sobre tobas, pumitas, lapillis y otros productos de eyección volcánica. Suelen desarrollar una secuencia de horizontes del tipo AC o ABC. La rápida alteración de los materiales volcánicos porosos, provoca una acumulación de complejos organo metálicos estables con una elevada relación catión/anión. Los minerales formados están limitados a alofana, imogolita y ferrihidrita, principalmente. Son perfiles que se encuentran en áreas onduladas a montañosas de las regiones húmedas, desde el ártico al trópico, bajo un amplio rango de formaciones vegetales.

Vertisol

El término vertisol deriva del vocablo latino "vertere" que significa verter o revolver, haciendo alusión al efecto de batido y mezcla provocado por la presencia de arcillas hinchables. Son suelos que se forman de un material constituido originalmente por sedimentos que poseen una elevada proporción de arcillas esmectíticas, o productos de alteración de rocas que las generen. Los perfiles muestran frecuentemente una secuencia de horizontes de tipo A-B-C. La alternancia entre el hinchamiento y la contracción de las arcillas, genera profundas grietas en la estación seca y la formación de superficies de presión y agregados estructurales en forma de cuña en los horizontes subsuperficiales. Son suelos muy duros en la estación seca y muy plásticos en la húmeda. Suelen desarrollarse en depresiones de áreas llanas o suavemente onduladas, bajo un clima tropical, semiárido a subhúmedo o mediterráneo con estaciones contrastadas en cuanto a humedad.

Luvisol

El término Luvisol deriva del vocablo latino "luere" que significa lavar, haciendo alusión al lavado de arcilla de los horizontes superiores para acumularse en una zona más profunda. Se desarrollan principalmente sobre una gran variedad de materiales no consolidados como depósitos glaciares, eólicos, aluviales y coluviales. Poseen una secuencia de horizontes de tipo A-Bt-C. Sobre el horizonte árgico puede aparecer un albico, en este caso son intergradados hacia los albeluvisoles. Predominan en zonas llanas o con suaves pendientes de climas templados fríos o cálidos pero con una estación seca y otra húmeda, como el clima mediterráneo.

Calcisol

El término Calcisol deriva del vocablo latino "calcarium" que significa calcáreo, haciendo alusión a la sustancial acumulación de caliza secundaria. Se forman a partir de depósitos aluviales, coluviales o eólicos de materiales alterados ricos en bases. Presentan una secuencia de horizontes de tipo ABC, en donde el horizonte superficial es de color pálido y de tipo ócrico; el B es cámbico o árgico impregnado de carbonatos, e incluso vértico. En el horizonte C siempre hay una acumulación de carbonatos. Son suelos que se asocian con un clima árido o semiárido. La sequía, la pedregosidad de algunas zonas, y la presencia de horizontes petrocálcicos someros, son las principales limitaciones a su utilización agrícola.

10 E Documentación



ASUNTO: Voto aprobatorio para examen de grado

Toluca de Lerdo, Estado de México a 3 de febrero de 2017

Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo

Coordinadora

Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México

PRESENTE

Por este conducto, me permito comunicarle que he leído y revisado el manuscrito de la tesis que lleva por título:

Estudio de la mineralogía magnética y sus propiedades en secuencias pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como fuente complementaria de información ambiental, pedogénesis y evolución de los suelos volcánicos en México elaborado por el estudiante de doctorado Jorge Francisco Rivas Ortiz, con número de cuenta 9458997-3, adscrito al programa de posgrado que usted dirige.

Considero que el documento cumple con los requisitos señalados por el Posgrado para que el estudiante cuente con mi aprobación y continúe con los trámites pertinentes a fin de solicitar fecha para el examen de grado.

Sin más por el momento, aprovecho este medio para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

Dr. Héctor Víctor Cabadas Báez

Profesor-Investigador Definitivo "B" de T.C.

Laboratorio de Geología

Facultad de Geografía, UAEMEX

hvcabadasb@uaemex.mx Tel. 722 2143182 Ext. 183



Universidad Nacional
Autónoma de México

INSTITUTO DE GEOFÍSICA



ASUNTO: Voto aprobatorio para examen de grado

Ciudad Universitaria, Ciudad de México a 10 de MARZO de 2017

Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo
Coordinadora
Posgrado en Ciencias de la Tierra
Instituto de Geofísica, (UNAM)

P R E S E N T E

Por este conducto me permito comunicarle que he leído y revisado el manuscrito de la tesis que lleva por título:

"Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México" que el alumno Jorge Francisco Rivas Ortiz, con número de cuenta 9458997-3, adscrito al programa de Posgrado (Ciencias de la Tierra) ha elaborado para la obtención del grado de doctor en Ciencias.

Considero que el documento cumple con los requisitos señalados por el Posgrado, por lo que el estudiante cuenta con mi voto aprobatorio para que continúe con los trámites, a fin de solicitar la fecha de examen de grado.

Sin más por el momento, aprovecho el medio y la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente:

Dr. Avto Gogichaishvili
Laboratorio de Magnetismo Natural (LIMNA), UNAM
Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán,
(IGUM), UNAM



Tel: 5622 4326
Fax: 5616 2146
www.igeograf.unam.mx
Circuito Exterior s/n.
Ciudad Universitaria,
C.P. 04510, México, D.F.
Addd. Postal 20 850

Ciudad Universitaria, 15 de marzo de 2017

Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo
Coordinadora
Posgrado en Ciencias de la Tierra
UNAM

Por este conducto me permito comunicarle que he revisado el manuscrito de la tesis que lleva por título:

"Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos en México" que el alumno **JORGE FRANCISCO RIVAS ORTIZ**, con número de cuenta 9458997-3, adscrito al programa de Posgrado (Ciencias de la Tierra), ha elaborado para la obtención del grado de doctor en Ciencias.

Considero que el documento cumple con los requisitos señalados por el Posgrado, por lo que el estudiante cuenta con mi voto aprobatorio para continuar con los trámites, con el fin de solicitar la fecha de examen de grado.

Sin más por el momento, aprovecho el medio y la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente

Dr. Lorenzo Vázquez Selem
Departamento de Geografía Física
Instituto de Geografía, UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

gEOFISICA
UNAM

ASUNTO: Voto aprobatorio examen de grado.

Ciudad Universitaria, 27 de marzo 2017.

Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo
Coordinadora
Posgrado en Ciencias
De la Tierra.
UNAM
PRESENTE

Por este medio le comunico que he leído y revisado el manuscrito de la tesis que lleva por título: *Estudio de la Mineralogía Magnética y sus Propiedades en Secuencias Pedológicas de la Faja Volcánica Transmexicana como Fuente Complementaria de Información Ambiental, Pedogénesis y Evolución de los Suelos Volcánicos de México*, que el alumno JORGE FRANCISCO RIVAS ORTIZ, con número de cuenta 9458997-3, adscrito al programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, ha elaborado para la obtención del grado de doctor en Ciencias.

Considero que el documento cumple con los requisitos señalados por el Posgrado, por lo que el estudiante cuenta con mi voto aprobatorio para continuar con los trámites, con el fin de solicitar la fecha de examen de grado.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

Atentamente,

Dra. Beatriz Ortega Guerrero
Departamento de Geomagnetismo y Exploración
Instituto de Geofísica.



INSTITUTO DE
GEOLOGÍA
EDAFOLOGÍA

Cd. Universitaria 3 de abril de 2017

COMITÉ ACADÉMICO

Posgrado en Ciencias de la Tierra
Presente

Por medio de la presente me permito informarle que he revisado el trabajo que presenta el alumno **JORGE RIVAS ORTIZ** con número de cuenta 94589973, para obtener el grado de **Doctor en Ciencias**, el cual lleva por título: "**ESTUDIO DE LA MINERALOGÍA MAGNÉTICA Y SUS PROPIEDADES EN SECUENCIAS PEDOLÓGICAS DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA COMO FUENTE COMPLEMENTARIA DE INFORMACIÓN AMBIENTAL, PEDOGÉNESIS Y EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS VOLCÁNICOS DE MÉXICO**". Considero que la tesis presentada reúne los requisitos para que el alumno pueda graduarse, por lo que extiendo mi **VOTO APROBATORIO**.

Sin más por el momento, y agradeciendo la atención que se sirva prestar a la presente, reciba un cordial saludo.

Atentamente:



Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo
Instituto de Geología
Investigador Titular B

