



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA
CIENCIAS AMBIENTALES

**USO DE PROPIEDADES MAGNÉTICAS EN SUELOS COMO INDICADORES
PALEO-AMBIENTALES Y DE ACTIVIDADES HUMANAS ANTIGUAS**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

HERMENEGILDO BARCEINAS CRUZ

TUTORA PRINCIPAL DE TESIS: DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO
IGL UNAM

COMITÉ TUTOR: DRA. BEATRIZ ORTEGA GUERRERO
DRA. ANA MARÍA SOLER ARECHALDE
IGF UNAM

MÉXICO, D.F. JULIO DE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

AGRADECIMIENTOS

A la U.N.A.M. por brindarme la oportunidad de ser parte de su comunidad, por todo el conocimiento y experiencia que me ha permitido adquirir a lo largo de mi estancia en ella, a cambio de mi compromiso y dedicación, logrando así una mejor formación personal y académica.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado por permitirme continuar con mis estudios y formación académica.

A CONACYT por otorgarme la beca y hacerme fuerte económicamente durante mis estudios.

Al Instituto de Geología por permitirme estudiar un posgrado, brindándome las herramientas necesarias para poder concluirlo y por el apoyo económico otorgado durante dicha etapa.

A los proyectos PAPIIT IN117709 (Dra. Solleiro) e IN108714-2 (Dr. Sedov), y CONACYT 166878 (Dra. Solleiro, Dr. Sedov) por el apoyo económico otorgado para la realización de esta tesis en sus diferentes etapas.

A la Dra. Elizabeth Solleiro por su asesoría que fue de vital importancia para llevar a cabo este proyecto.

Al jurado, conformado por la Dra. Beatriz Ortega, Dra. Ana María Soler, Dra. Bertha Aguilar y Dra. Guadalupe Sánchez, por su ayuda para mejorar mi trabajo de tesis.

A quienes me prestaron su apoyo para realizar este trabajo: Dr. Sergey Sedov, Mtra. Tamara Cruz, Mtro. Serafín Sánchez, Mtro. Jaime Díaz.

Índice general

Índice general	1
1. Introducción	3
1.1. Justificación	5
1.2. Hipótesis	5
1.3. Objetivos	6
1.3.1. Objetivos Generales	6
1.3.2. Objetivos Particulares	6
2. Marco Teórico	7
2.1. Propiedades Magnéticas de la Materia	7
2.2. Parámetros Magnéticos	8
2.2.1. La Susceptibilidad Magnética	8
2.2.2. Tamaño de Partícula Magnética	9
2.2.3. Magnetizaciones Remanentes	10
2.2.4. Parámetros del Magnetismo Ambiental	11
2.2.5. Ciclo de Histéresis Magnética	12
2.2.6. Temperaturas Características	13
2.3. Mineralogía Magnética	13
2.3.1. Óxidos de Hierro	14
2.3.2. Oxi-hidróxidos de Hierro	15
2.3.3. Sulfuros de Hierro	15
2.3.4. Carbonato de Hierro	15
2.4. Magnetismo en Suelos y Paleosuelos	15
2.4.1. Características del Suelo debido a Actividades Antrópicas . . .	17
3. Materiales y Métodos	21
3.1. Paleosuelos de La Playa, Sonora	21
3.1.1. Marco Geográfico	21
3.1.2. Marco Cultural	21

3.1.3.	Caracterización de los Perfiles de La Playa	23
3.2.	Paleosuelos de Teotihuacan	26
3.2.1.	Marco Geográfico	26
3.2.2.	Marco Cultural	28
3.2.3.	Caracterización del Perfil San Pablo	29
3.3.	Metodología	29
4.	Análisis y Discusión de Resultados de La Playa	33
4.1.	Resultados de La Playa	33
4.1.1.	Parámetros magnéticos del perfil Hornos 1	33
4.1.2.	Parámetros magnéticos del perfil Hornos 2	35
4.1.3.	Parámetros magnéticos del Perfil Canal 2	35
4.1.4.	Curvas de κ vs T en muestras seleccionadas de la Playa	37
4.1.5.	Ciclos de histéresis de muestras seleccionadas	40
4.2.	Comportamiento magnético de PSR en La Playa y su relación con los procesos pedogenéticos	40
4.3.	Parámetros magnéticos del PB en La Playa y su relación con los procesos pedogenéticos	43
4.4.	Reconstrucción ambiental de La Playa, con base en el magnetismo	44
5.	Análisis y Discusión de Resultados de Teotihuacan	47
5.0.1.	Parámetros magnéticos del Perfil San Pablo	47
5.0.2.	Curvas κ vs T en muestras seleccionadas de San Pablo	51
5.1.	Comportamiento magnético del PNSP en Teotihuacan y su relación con los procesos pedogenéticos	51
5.2.	Reconstrucción ambiental del perfil San Pablo, en Teotihuacan, con base en el magnetismo	54
6.	Señal magnética debido a actividad humana	57
7.	Conclusiones	61
	Bibliografía	63

1 | Introducción

Los estudios de magnetismo ambiental se inician en 1926, cuando Gustav Ising lleva a cabo el primer estudio sobre sedimentos lacustres, en donde se documenta que la susceptibilidad magnética y la magnetización remanente natural varían en las diferentes capas del cuerpo sedimentario, y que esto tiene relación con variaciones estacionales y con la cercanía a las márgenes de la capa de hielo glacial (Ising, 1943). Sin embargo, el magnetismo ambiental se constituye formalmente como disciplina en la década de los 80's (Thompson *et al.*, 1980). Esta disciplina se basa en conocer las propiedades magnéticas de las muestras con el fin de deducir la concentración, tamaño de grano y mineralogía de los minerales magnéticos presentes. Las propiedades magnéticas son usadas, entonces, como indicadores en diferentes estudios para evaluar: la contaminación por el uso de combustibles fósiles y de la industria metalúrgica y cementera (Hulett *et al.*, 1980; Flanders *et al.*, 1994; Strzyszcz *et al.*, 1996; Aguilar-Reyes *et al.*, 2013); el impacto de incendios, ya sea naturales o inducidos (Schwertmann and Heineman, 1959; Le Borgne, 1960; Kletetschka and Banerjee, 1995; Blake *et al.*, 2006); la erosión y la re-distribución del suelo (Dearing *et al.*, 1986; Royall, 2001; Landgraf y Royall 2006); asimismo, se usan para delimitar las áreas de humedales o de suelos con propiedades gléyicas (Grimley and Vepraskas, 2000; Simms and Lobred, 2011; Jordanova *et al.*, 2013); el cambio de uso de suelo (Abbaszadeh-Afshar *et al.*, 2010; Mokhtari- Karchegani *et al.*, 2011), entre otros aspectos.

Dada la relación cercana entre la susceptibilidad magnética y los procesos de formación de suelo, ésta ha sido empleada en la determinación de las condiciones ecológicas dominantes (Singer *et al.*, 1996), los procesos de erosión-sedimentación (Caitcheon, 1993; Rivas *et al.*, 2012) y el grado y tipo de horizontalización (Grimley *et al.* 2004); en climosecuencias (Orgeira *et al.*, 2009) y en estudios paleoambientales. Con respecto a este último punto, los estudios que usan al magnetismo como indicador paleoambiental se refieren a las secuencia de loess-paleosuelos (e.g. Verosub *et al.*, 1993; Hunt *et al.*, 1995; Maher *et al.*, 2003). En este tipo de secuencias se registra un aumento en los valores de la susceptibilidad magnética llamada realce magnético o enhancement, el cual se produce por procesos pedogenéticos (oxidación,

reducción, deshidratación de minerales portadores de hierro) al formarse óxidos de hierro fuertemente magnéticos (magnetita y maghemita), a partir de minerales de hierro magnéticamente más débiles presentes en el material parental (Dearing *et al.*, 1996).

También se ha hecho una comparación entre los patrones de variación de la susceptibilidad magnética con los de isótopos de oxígeno O^{18} , encontrándose que las etapas isotópicas que marcan periodos cálidos y húmedos (interglaciares) corresponden a las capas que presentan el realce magnético característico de los paleosuelos; mientras que los valores isotópicos que indican periodos fríos y secos (glaciares), condiciones adecuadas para la acumulación de loess, coinciden con los decrementos en la susceptibilidad magnética (Maher *et al.*, 2003). Incluso algunos autores se dieron a la tarea de evaluar la relación entre los valores de susceptibilidad magnética en suelos modernos con los valores de precipitación actuales, para hacer un cálculo de la paleoprecipitación (Shankar *et al.*, 2006).

Por otro lado, también se ha investigado la relación que guardan las propiedades magnéticas en el suelo con algunas actividades humanas, tanto en el presente, en el caso de estudios de contaminación industrial y vehicular, como en el pasado, para el caso de estudios magnéticos en paleosuelos relacionados con contextos arqueológicos. El pionero en el estudio de magnetismo en suelos relacionados a un contexto arqueológico fue Le Borgne, que en los años 50's comenzó a estudiar el realce magnético de los suelos de Bretaña, en el norte de Francia (Le Borgne, 1950 y 1951), al principio interesado en la señal magnética del lecho rocoso y considerando a la señal del suelo únicamente como ruido. En otros trabajos se realizó la caracterización magnética de los objetos para detectar actividades constructivas tomando en cuenta que los humanos hacen una selección de materiales, los cuales producen una firma particular y son distinguibles del entorno natural (ej.: Becker and Fassbinder, 1999). Las actividades funerarias producen una señal magnética, ya que la cremación deja un rastro de minerales ferrimagnéticos producidos durante la combustión (ej.: Marshall, 1998), o en el caso de los entierros, se puede detectar un cambio en las propiedades magnéticas debido a la adición de un sustrato orgánico que proporciona el cuerpo en descomposición, lo cual modifica localmente las condiciones del suelo (Linford, 2002). Con respecto a las prácticas agrícolas, se ha reconocido que los parámetros magnéticos pueden ser útiles para detectarlas en sitios con actividad prehistórica (Kleber *et al.*, 2003), ya que se producen cambios por la adición de materia orgánica y la combustión de esta, lo que resulta en la formación de Black Carbon o carbono quemado, que es fácilmente distinguible en los suelos por su señal magnética (Kletetska and Banerjee, 1995).

1.1. Justificación

Dado que en estos momentos ha tomado importancia el conocer la dinámica de cambios en las condiciones ambientales, y el papel que juegan las actividades humanas en esto, se está recurriendo a varias disciplinas que conforman las Ciencias de la Tierra para tener indicadores que nos permitan inferir cómo han ocurrido estos cambios, con qué frecuencia, en qué momento, etc. El magnetismo ambiental ha demostrado que las propiedades magnéticas de rocas son sensibles a estos cambios ambientales, por lo tanto, constituyen un indicador que nos puede guiar en la resolución de estas cuestiones.

En los sitios que se estudian en este trabajo, se tiene una serie de ciclos pedológicos y de sedimentación que dan cuenta de una dinámica de cambio que se desea explicar. Además, los sitios presentan ocupación humana a lo largo de miles de años, y muestran evidencias de una variedad de actividades que pueden haber dejado una huella en las propiedades magnéticas en los suelos de ocupación, por lo que resulta interesante saber en qué medida las actividades humanas afectan las condiciones ambientales en la zona, y a su vez, en qué medida las condiciones ambientales determinan la forma de vida de una población humana.

1.2. Hipótesis

Los procesos pedogenéticos están fuertemente influenciados por las condiciones ambientales, y dichos procesos conllevan la formación y transformación de minerales magnéticos específicos para ciertas condiciones, por lo que podemos decir que las propiedades magnéticas de rocas aplicadas al estudio de suelos tienen el potencial de ser usadas como un indicador paleo-ambiental.

Además, la especie humana se caracteriza por modificar su entorno, por lo que las actividades humanas pueden ser un factor de cambio climático a nivel local, regional o incluso global (como sucede actualmente). Entonces, si estas actividades pueden modificar las condiciones del medio ambiente, también deben modificar las propiedades magnéticas de rocas en una secuencia edafo-sedimentaria que presenta ocupación humana; y el conocer como han cambiado las propiedades magnéticas nos permitirá inferir qué tipo de actividad se llevó a cabo en el sitio, y qué influencia tuvo en el entorno.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos Generales

En este trabajo se pretende identificar las propiedades magnéticas (concentración, tamaño y mineralogía de las partículas magnéticas) de secuencias edafosedimentarias de dos sitios contrastantes, La Playa, en Sonora, y San Pablo, en Teotihuacan, en los que hay evidencia de fuerte perturbación antrópica. Dichas propiedades se correlacionan primero con las propiedades pedológicas y, posteriormente, con las condiciones ambientales.

También se intenta adquirir un mayor entendimiento sobre el papel que guarda el ser humano como motor de cambios en las propiedades magnéticas del suelo, es decir, reconocer la firma magnética que pueden dejar las actividades antrópicas en el suelo.

1.3.2. Objetivos Particulares

- Conocer las propiedades de los minerales magnéticos presentes en el suelo, a través de la medición de la susceptibilidad magnética, magnetizaciones remanentes, ciclos de histéresis y caracterización térmica.
- Comparar las propiedades magnéticas con otros indicadores pedológicos con el fin de probar si existe alguna correlación.
- Comparar los diferentes ciclos pedológicos que componen las secuencias edafosedimentarias, así como entre los diferentes horizontes que componen a cada ciclo.
- Hacer una interpretación de las propiedades magnéticas del suelo como indicadores de procesos pedológicos, así como de paleo-climas.
- Buscar una correlación entre las propiedades magnéticas del suelo y las actividades humanas que se hayan llevado a cabo en él, así como evaluar la posibilidad de que éstas sean la causa de cambios en el medio ambiente.

2 | Marco Teórico

2.1. Propiedades Magnéticas de la Materia

En la naturaleza, toda la materia tiene un comportamiento ante la presencia de campos magnéticos, aunque ésta será diferente dependiendo de la configuración electrónica de los átomos y las moléculas que la componen. Según este comportamiento, los materiales se pueden clasificar en tres grupos: diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, ferrimagnéticos y antiferromagnéticos.

Una de las formas en que se genera un campo magnético es a través de una corriente eléctrica (cargas eléctricas en movimiento), y justamente un electrón en su órbita es un pequeño circuito de corriente eléctrica. Además, el electrón por sí mismo presenta un momento magnético intrínseco al que se llama espín. Entonces, son estos pequeños campos magnéticos provenientes del movimiento electrónico los que interactúan con un campo magnético externo, y la respuesta depende del número de electrones no apareados que tenga el átomo en su última capa.

El diamagnetismo es el comportamiento de los materiales cuyos electrones están completamente apareados, es decir que para cada momento magnético de un electrón hay otro en el sentido opuesto, por lo que el momento magnético neto es nulo. Debido a esto, los materiales diamagnéticos son ínfimamente afectados por campos magnéticos externos; de hecho, éstos adquieren una muy débil magnetización en dirección contraria al campo externo. Ejemplos de materiales diamagnéticos son el agua, el sílice, los carbonatos, la materia orgánica, entre otros.

El paramagnetismo se presenta en los materiales que tienen por lo menos un electrón sin aparear, lo que implica que al menos un momento magnético no se ha anulado y es capaz de interactuar con un campo magnético externo, produciéndose una magnetización en el material; es decir, que el momento magnético del átomo se alinea en la dirección del campo aplicado. Pero esta alineación no es perfecta debido a la energía térmica del átomo, por lo que el paramagnetismo muestra una fuerte dependencia de la temperatura, siendo menor la magnetización mientras ma-

yor sea la temperatura. Cabe mencionar que los materiales con los comportamientos magnéticos mencionados hasta el momento no son capaces de tener una magnetización remanente, sólo pueden tener una magnetización inducida; es decir que sólo se magnetizan mientras está el campo presente y en cuanto se les deja de aplicar éste, la magnetización desaparece.

El ferromagnetismo es el comportamiento magnético más fuerte (mucho más que los dos anteriores), y el más importante para los estudios de paleomagnetismo y magnetismo de rocas. Éste se presenta en los elementos cuya subcapa $3d$ contiene electrones no apareados, como el hierro (del cual toma su nombre este comportamiento), el cobalto y el níquel. Estos electrones de la subcapa abierta tienden a acoplarse y alinear sus momentos magnéticos en una misma dirección, haciendo que el material adquiera una magnetización muy fuerte, la cual pueden conservar durante mucho tiempo aún sin la presencia de un campo magnético externo.

El hierro, que es mucho más abundante en la corteza terrestre que los otros dos elementos ferromagnéticos, al combinarse con otros elementos (como el oxígeno y el azufre) para formar compuestos (como óxidos, sulfuros, oxi-hidróxidos, etc.), deja de cumplir a la perfección con esta propiedad y, en cambio, presenta algunas variaciones de ella, a las que se les llama Ferrimagnetismo y Antiferromagnetismo. Estos comportamientos magnéticos se deben a que en la red cristalina del compuesto se encuentran dos subredes, una con sus momentos magnéticos alineados en la misma dirección pero en sentido opuesto a los de la otra. Para el ferrimagnetismo, los momentos magnéticos de una de las subredes son menores a los de la otra, por lo que el momento magnético neto es diferente de cero, permitiéndoles adquirir una magnetización. Mientras que para el antiferromagnetismo, los momentos magnéticos de ambas subredes son iguales, lo que implicaría que se anulan; sin embargo, sí poseen un momento magnético distinto de cero debido a imperfecciones en la red cristalina y a que a veces estos momentos no son completamente antiparalelos, evitando que se anulen por completo. La mayoría de los minerales de interés para el magnetismo ambiental presenta estos últimos dos comportamientos. (Tauxe, 2010).

2.2. Parámetros Magnéticos

2.2.1. La Susceptibilidad Magnética

Una forma rápida de cuantificar las propiedades de un material es a través de su susceptibilidad magnética. La susceptibilidad magnética κ se define como la magnetización por unidad de volumen, M , que adquiere un cuerpo debido a la presencia

de un campo magnético externo, H ; y se expresa de la siguiente forma:

$$\kappa = M/H. \quad (2.1)$$

Debido a que tanto M como H tienen las mismas unidades (A/m), κ (propia- mente la susceptibilidad magnética volumétrica) es una cantidad adimensional. Para obtener la susceptibilidad magnética por unidad de masa, χ , se debe dividir κ entre la densidad, ρ , del material; es decir:

$$\chi = \kappa/\rho. \quad (2.2)$$

Entonces χ tiene unidades recíprocas a la densidad (m^3/kg).

Los materiales diamagnéticos presentan valores de χ negativos y del orden de $10^{-8}m^3/kg$. Siendo el agua el material más diamagnético con $\chi = -0,9 \times 10^{-8}m^3/kg$, mientras que otros minerales formadores de roca como el cuarzo y la calcita tienen apenas la mitad de este valor. Por otra parte, los materiales paramagnéticos presentan valores de χ del orden $10^{-7}m^3/kg$.

Los materiales ferromagnéticos presentan valores de χ de cien a mil veces mayores que los anteriores. Pero para estos materiales la relación M/H es más complicada (no lineal), y por lo general se mide la susceptibilidad en campo bajo χ_{LF} (Low Field) a la cual se le llama también susceptibilidad inicial y representa la pendiente de la curva en la parte cercana al origen de una gráfica M vs H . (Evans and Heller, 2003).

2.2.2. Tamaño de Partícula Magnética

Dentro de una partícula de algún mineral ferromagnético, un dominio es una región en la cual todos los momentos magnéticos están alineados en una misma dirección. Cuando en una misma partícula se tienen varios dominios, se le llama multidominio (MD), y se da por lo general en partículas de grano grueso, de diámetro $d > 1\mu m$. La tendencia de los momentos magnéticos de un grano a separarse en varios dominios se debe a que la energía requerida para mantenerlos alineados a todos en una misma dirección es mayor que la energía de los campos magnéticos a los cuales pudo haber estado sometido un grano de material ferromagnético en la naturaleza.

Si el volumen de la partícula es lo suficientemente pequeño, existen algunas direcciones "fáciles" en las cuales la energía requerida para alinear los momentos magnéticos es mucho menor, permitiendo que se forme una partícula de dominio único (SD por *single domain*). Estas partículas suelen tener un diámetro entre 0.1 y

0.01 μm . Existe también un tamaño intermedio de dominio ($1\mu\text{m} > d > 0,1\mu\text{m}$) al cual se le llama dominio pseudo-único (PSD por *pseudo-single domain*). Las partículas de este tamaño tienen un número reducido de dominios lo cual les permite tener características parecidas a las de las SD.

Hay un cuarto tamaño de partícula, que es el más pequeño ($d < 0,01\mu\text{m}$); a las partículas de este tamaño se les denomina superparamagnéticas (SP). Éstas partículas se comportan como un ferrimagnético; es decir, se magnetizan fuertemente y suelen alcanzar magnetizaciones de saturación en campos relativamente bajos, pero no guardan una magnetización remanente al igual que los paramagnéticos. Esto es debido a que en la magnetización sucede un fenómeno parecido al del decaimiento radioactivo (pero de naturaleza totalmente distinta, cabe aclarar que no guarda ninguna relación con éste), en el cual el momento magnético de algunas de las moléculas de la red cristalina tiende a invertirse espontáneamente en algún tiempo determinado, lo cual es imperceptible en una partícula más grande, pero en una partícula tan pequeña como las SP suele disminuir drásticamente su magnetización.

El tamaño de los dominios es importante en el estudio del magnetismo ambiental ya que, por lo general, las partículas finas se pueden asociar a procesos diagenéticos en los sedimentos y pedogenéticos en los suelos. De hecho, la presencia de partículas SD y SP se atribuye a la actividad biológica de algunas bacterias que metabolizan los minerales de hierro y los convierten en partículas finas y ultra-finas de magnetita (óxido de hierro fuertemente magnético). (Evans and Heller, 2003).

2.2.3. Magnetizaciones Remanentes

Hay varios tipos de magnetización remanente dependiendo de la forma en la cual un material adquiera la magnetización. Algunas suceden en la naturaleza y otras son producto de la aplicación de campos magnéticos en el laboratorio.

A la magnetización que tiene una muestra in situ y medida en el laboratorio sin haberle hecho tratamiento alguno o sometido a alguna otra fuente de magnetización se le llama *magnetización remanente natural* (NRM, por sus siglas en inglés) y es el resultado de todas las magnetizaciones a las cuales fue expuesta. En el campo de los estudios paleomagnéticos se busca obtener la primera magnetización que el material adquirió durante el momento de su formación, a ésta se le llama *magnetización remanente característica* (ChRM, por sus siglas en inglés).

Dentro de las magnetizaciones de origen natural se encuentra la *magnetización termo-remanente* (TRM, por sus siglas en inglés) que adquiere un material al enfriarse en presencia de un campo magnético después de haber estado sometido a

temperaturas mayores al punto de Curie, que es la temperatura a partir de la cual un material no es capaz de adquirir una magnetización, como en el caso de una lava que se enfría en presencia del campo magnético terrestre. Otro tipo de magnetizaciones remanentes naturales son la *magnetización remanente detrital* (DRM, por sus siglas en inglés), y la *magnetización remanente química* (CRM, por sus siglas en inglés). La DRM es la que adquieren las partículas que viajan suspendidas en algún fluido (agua o aire) y que al ser depositadas conservan esta magnetización, mientras que la CRM es la magnetización que adquiere alguna capa de suelo o sedimento después de la transformación química de algunos de sus componentes en materiales fuertemente magnetizables.

Las magnetizaciones que son producto de la aplicación de campos en el laboratorio son la *magnetización anhisterética remanente* (ARM), la *magnetización isotérmica remanente* (IRM) y la *magnetización isotérmica remanente de saturación* (SIRM). La ARM se adquiere al aplicar un campo magnético alterno en presencia de uno constante, esta magnetización es muy sensible al tamaño de dominio. La IRM se adquiere aplicando a la muestra campos magnéticos de alta intensidad a temperatura ambiente, con lo cual podemos conocer su comportamiento en el proceso de saturación de la muestra. Mientras que la SIRM simplemente se trata de la remanencia después de haber aplicado el campo más alto que se pueda generar en el laboratorio. (Butler, 1992).

2.2.4. Parámetros del Magnetismo Ambiental

En los estudios de magnetismo ambiental se emplean frecuentemente parámetros útiles para cuantificar algunas propiedades magnéticas y extraer rápidamente la información necesaria para abordar el fenómeno a estudiar. Para calcular estos parámetros se usan diferentes tipos de susceptibilidades medidas en el laboratorio, así como magnetizaciones remanentes y parámetros de las curvas de histéresis. También se puede obtener información al graficar algunos parámetros en función de otros.

Dentro de los parámetros de susceptibilidad se puede obtener la susceptibilidad a baja frecuencia χ_{lf} y a alta frecuencia χ_{hf} , y calcular la diferencia porcentual entre ellas, a lo cual se le llama susceptibilidad dependiente de frecuencia χ_{fd} . Es decir:

$$\chi_{fd} = (1 - \chi_{hf}/\chi_{lf}) \times 100 \%. \quad (2.3)$$

Debido a que las partículas SP no responden a campos de alta frecuencia y dejan de contribuir a la susceptibilidad, χ_{fd} es un buen indicador de la presencia de éstas.

ARM/IRM y SIRM/ χ_{lf} son usados como indicadores de tamaño de partícula

de magnetita, ya que las partículas pequeñas tienden a valores más altos porque presentan una adquisición más eficiente de remanencia magnética, especialmente ARM. Por lo anterior, las muestras que contengan una fracción más abundante de partículas SD y PSD, presentarán los valores más altos de ARM/IRM, mientras que en el caso de SIRM/ χ_{lf} se combina la dependencia del tamaño del numerador con la independencia del denominador, lo que conlleva a que mientras mayor sea el valor de éste, mayor la abundancia de partículas finas.

Los parámetros llamados cocientes S_{-x} son usados para cuantificar la dureza o suavidad de la muestra, que corresponde al contenido de antiferromagnéticos de alta coercitividad (duros) y ferrimagnéticos de baja coercitividad (suaves). Este parámetro se obtiene midiendo la SIRM de la muestra y la posterior aplicación de una IRM_{-x} en el sentido opuesto, y calculando la razón entre IRM_{-x} y SIRM. Es decir:

$$S_{-x} = IRM_{-x}/SIRM \quad (2.4)$$

También se usan el parámetro HIRM, que es la diferencia entre IRM_{-300} y SIRM dividida entre 2.

$$HIRM = (IRM_{-300} + SIRM)/2 \quad (2.5)$$

Los materiales ferrimagnéticos tienden a remagnetizarse fácilmente, por lo cual adquieren una magnetización mayor que la que adquieren los antiferromagnéticos al aplicar el campo en sentido contrario; es decir que los valores de S_{-x} son mayores para los materiales ferromagnéticos, y típicamente los valores de HIRM presentan un comportamiento inverso. (Evans and Heller, 2003).

2.2.5. Ciclo de Histéresis Magnética

Como ya mencionamos, mientras que los diamagnéticos y paramagnéticos sólo pueden tener una magnetización inducida, los ferromagnéticos adquieren una magnetización remanente. Esto quiere decir que si primero se aplica un campo H lo suficientemente intenso como para que el material alcance una magnetización de saturación (M_s), y después se lleva el campo H a cero, este cuerpo no volverá a tener su magnetización original, sino una magnetización remanente de saturación (M_{rs}); a esto se le conoce como Histéresis Magnética. Si aplicamos el campo en la dirección contraria hasta que se alcance nuevamente la saturación y dejamos reducir el campo H hasta cero otra vez, obtendremos un Ciclo de Histéresis.

Conocer los puntos clave del ciclo de histéresis es muy útil para conocer las propiedades magnéticas del objeto a estudiar, ya que nos permite identificar la mineralogía magnética y el tamaño de dominio de una muestra. Además de las magnetizaciones ya mencionadas (M_s y M_{rs}), se puede conocer el campo aplicado en la

dirección negativa al cual la magnetización vuelve a ser nula, el cual es llamado campo coercitivo H_c ; también se puede encontrar el valor del campo magnético al cual la magnetización remanente vuelve a ser nula; a este campo se le llama coercitividad remanente H_{cr} . (Tauxe, 2010).

2.2.6. Temperaturas Características

Debido a que las propiedades magnéticas tienen una gran dependencia con la temperatura, una técnica muy útil para identificar la mineralogía de la fracción magnética presente en las muestras es someterlas a cambios de temperatura, con lo cual se inducen transiciones magnéticas que se presentan a temperaturas específicas para cada tipo de mineral.

Una de las más usadas es la *Temperatura de Curie* T_C , que es la temperatura a la cual un material pasa del estado ferrimagnético al paramagnético, cuando la energía de acoplamiento entre los momentos magnéticos de los átomos de la red cristalina se ve superada por la energía térmica. Para los materiales antiferromagnéticos hay una temperatura análoga llamada *Temperatura de Neel* T_N . Por otro lado, la temperatura a la cual un material, después de haber sido calentado sobre su punto de Curie, es capaz de adquirir una magnetización recibe el nombre de *Temperatura de Bloqueo* T_B .

A bajas temperaturas las configuraciones cristalinas de los materiales sufren cambios, por lo que también cambian sus propiedades magnéticas. La *Transición de Verwey* T_V es la temperatura a la cual los cationes se redistribuyen en la red cristalina de la magnetita, cambiándola de cúbica a monoclinica, por lo que cambia su anisotropía magnetocristalina. Por último, la *Transición de Morin* T_M es la temperatura a la cual un material antiferromagnético imperfecto sufre cambios en su red cristalina que lo llevan a la pérdida de sus imperfecciones y, por lo mismo, de su magnetización.

En la Tabla 1 se muestran los valores de las temperaturas características para algunos minerales magnéticos. (Tauxe, 2010).

2.3. Mineralogía Magnética

El hierro ocupa el cuarto lugar en abundancia en la corteza terrestre, después del oxígeno, el silicio y el aluminio. Presenta una gran tendencia a combinarse, sobre todo con el oxígeno, y forma una gran variedad de compuestos. Afortunadamente, los minerales de hierro de interés para el magnetismo ambiental, los cuales tienen las

Tabla 2.1: Temperaturas características de algunos minerales magnéticos.

Temperatura	T_C	T_N	T_B	T_V	T_M
Magnetita	580 °C	*	*	-150 °C	*
Hematita	*	675 °C	*	*	-15 °C
Maghemita	645 °C	*	*	*	*
Goethita	*	120 °C	*	*	*
Greigita	330 °C	*	*	*	*

propiedades que se busca estudiar, son limitados. Estos se pueden clasificar en óxidos de hierro, oxi-hidróxidos de hierro, sulfuros de hierro y un carbonato de hierro.

2.3.1. Óxidos de Hierro

Dentro de los minerales magnéticos, los de mayor abundancia en la corteza terrestre son los óxidos de hierro, y por ello también son de mucho interés para los estudios de magnetismo ambiental. Entre ellos se encuentra la magnetita y la serie de titanomagnetitas, y la hematita, y las series de las titanohematitas.

La magnetita (Fe_3O_4) es un mineral denso, negro, de superficie brillante, que es totalmente opaco al observarla en el microscopio. Tiene una estructura cristalina cúbica centrada y en forma de espinela. En su red incorpora cationes de hierro en sus dos estados de oxidación Fe^{3+} y Fe^{2+} , lo cual produce dos subredes con momentos magnéticos opuestos pero desiguales, por lo que es ferrimagnética; de hecho es el material más fuertemente ferrimagnético. La serie de las titanomagnetitas ($Fe_{3-x}Ti_xO_4$; $0 < x < 1$) consiste en la sustitución parcial del hierro por titanio, dependiendo de las condiciones de presión, temperatura y abundancia de Ti durante la cristalización de la magnetita.

La hematita ($\alpha - Fe_2O_3$) tiene una estructura cristalina hexagonal en la cual sus planos alternados poseen momentos magnéticos iguales pero en direcciones opuestas, por lo que se considera un antiferromagnético, pero posee una pequeña magnetización espontánea debido a una ligera desviación en los espines de sus átomos (*spin canting*) que evita que sean perfectamente antiparalelos. También la hematita presenta una serie de sustitución parcial de Fe por Ti llamada serie de las titanohematitas ($Fe_{2-y}Ti_yO_3$; $0 < y < 1$).

La maghemita ($\gamma - Fe_2O_3$) es la forma completamente oxidada de la magnetita. Tiene también una estructura cristalina cúbica, dentro de la cual dos terceras partes de los cationes Fe^{2+} se oxidan a Fe^{3+} , mientras que la tercera parte restante simplemente queda vacante, dando lugar a su magnetización espontánea, por lo cual

se considera un ferrimagnético.

2.3.2. Oxi-hidróxidos de Hierro

Estos compuestos son producto del intemperismo de las rocas, proceso que da como resultado una gran variedad de productos, de los cuales la goethita ($\alpha - FeOOH$) es el único que tiene valor por si mismo para el magnetismo de suelos. Otros productos como la ferrihidrita ($5Fe_2O_3 \Delta 9H_2O$) y la lepidocrocita ($\gamma - FeOOH$) son importantes en el sentido en el que son precursores de la magnetita y la hematita formada en los suelos a través de diversos procesos. La goethita es un material anti-ferromagnético de configuración hexagonal, que posee una magnetización espontánea debido a defectos en su red cristalina, lo cual provoca un antiferromagnetismo imperfecto.

2.3.3. Sulfuros de Hierro

Hay una gran variedad de compuestos de hierro y azufre, de los cuales la pirita (FeS_2) es el más común, pero es paramagnética, mientras que otros dos que ocurren naturalmente y tienen mayor relevancia para el magnetismo ambiental son la pirrotita y la greigita. La pirrotita se presenta en dos formas: la monoclinica (Fe_7S_8) que es ferrimagnética, y la hexagonal (Fe_9S_{10}) que es antiferromagnética. La greigita (Fe_3S_5) es un mineral cúbico y ferrimagnético, el cual últimamente se ha visto que se encuentra abundantemente en diversos ambientes sedimentarios, sobre todo relacionados con condiciones anóxicas reductoras. También se puede encontrar en forma de magnetosomas producidos por bacterias magnetotácticas en hábitats ricos en azufre.

2.3.4. Carbonato de Hierro

La siderita ($FeCO_3$) es un mineral paramagnético común en sedimentos carbonatados. Su importancia para el magnetismo ambiental recae en que su oxidación produce magnetita, maghemita o hematita.

2.4. Magnetismo en Suelos y Paleosuelos

El desarrollo de las propiedades magnéticas de un suelo comienzan desde el momento en que es depositado el material parental del cual se formará, y tanto el tipo de material parental como el proceso mediante el cual se deposita son determinantes. Los principales procesos mediante los cuales se transporta y deposita el material parental para un suelo son el fluvio-aluvial y el eólico.

El aumento de la señal magnética en suelos y paleosuelos está básicamente relacionado con la neoformación de minerales ferrimagnéticos a partir de los minerales de hierro presentes en el material parental con características magnéticas más débiles (antiferromagnéticos y paramagnéticos). Los procesos que dan lugar a la formación de éstos son de gran variedad y aún siguen en discusión, pero algunos autores han optado por centrarse en cinco principales que mencionaremos a continuación (Dearing et al., 1996).

1. El aporte detrítico proveniente de la contaminación atmosférica debida a las plantas generadoras de electricidad a base de combustible fósil, y la industria metalúrgica y cementera (Hulett *et al.*, 1980; Flanders *et al.*, 1994; y Strzyszcz *et al.*, 1996). Estos detritos están constituidos principalmente de esférulas de magnetita (y parcialmente hematita) de grano grueso (1-20 μm) que son transportadas como polvo y aerosoles a distancias variables de su fuente y son depositadas eventualmente en la superficie del suelo.
2. Incendios, ya sea naturales o debido a prácticas agrícolas, que provocan la transformación térmica de óxidos, hidróxidos y carbonatos de hierro magnéticamente débiles en magnetita y maghemita (Schwertmann and Heineman, 1959; Le Borgne, 1960; Kletetschka and Banerjee, 1995). Bajo las condiciones reductoras creadas por la combustión de la materia orgánica la hematita de grano fino y la siderita se reducen, y la goethita se deshidrata hacia magnetita, la cual posteriormente se oxida hacia maghemita. Los incendios afectan a la capa superficial del suelo y el realce magnético es altamente variable dependiendo del contenido de materia orgánica, las temperaturas alcanzadas, la porosidad del suelo y la pre-existencia de minerales portadores de hierro en el suelo.
3. Formación in situ de magnetita ultra-fina, debido a la transferencia de electrones provenientes de la descomposición de la materia orgánica hacia el Fe^{3+} , lo cual incrementa la actividad del Fe^{2+} (Maher and Taylor, 1988). Brennan and Lindsay (1998) encontraron experimentalmente que la exposición del suelo al oxígeno atmosférico causa que esté lo suficientemente oxidado como para formar ferrihidrita amorfa, lo cual aparenta controlar la solubilidad del hierro. También óxidos de Fe^{3+} cristalinos, como la hematita y la goethita, pueden controlar la solubilidad del hierro bajo condiciones oxidantes altamente estables. Por otro lado, durante una sumersión prolongada del suelo y con el sustrato orgánico adecuado, la formación de magnetita puede controlar la solubilidad del hierro en ambientes reductores. Estos ciclos de condiciones redox altamente variables pueden ser debido a cambios en la humedad y oxigenación del suelo provocados por variaciones en las secuencias climáticas.
4. La actividad metabólica de algunos microorganismos bacteriales tiene influen-

cia sobre la precipitación de óxidos de Fe^{3+} ; causando la oxidación de Fe^{2+} , y utilizando ligaduras orgánicas de compuestos de hierro. Esta actividad puede ser otra fuente de aumento in situ de la señal magnética en suelos. Si prevalecen las condiciones anaeróbicas, las bacterias pueden producir granos finos y ultrafinos de magnetita extracelular (Lovley *et al.*, 1987); o también se puede formar greigita debido a reducción microbiana (Stanjek *et al.*, 1994). Estas condiciones se pueden encontrar en podzoles periódicamente gleyzados y altamente podzolizados (Dearing *et al.*, 1996). Las bacterias magnetotácticas que producen cadenas intracelulares de magnetosomas de magnetita SD pueden existir bajo condiciones oxigenadas en la parte superior del suelo (Fassbinder *et al.*, 1990).

5. El intemperismo de minerales portadores de hierro, los ciclos de humidificación y secado del suelo, es decir, cambios en factores ambientales como temperatura, humedad, pH y contenido de materia orgánica, pueden producir soluciones de Fe^{2+} que se encuentran oxidadas, y, favorecidas por la presencia de materia orgánica, formen ferrihidrita cuando la concentración crítica es alcanzada (Schwertmann, 1988a, 1988b). La ferrihidrita es el óxido de hierro más fácilmente reducible y ocurre bajo periodos cortos de condiciones anaerobias en suelos bien drenados. Las bacterias reductoras de hierro que utilizan la ferrihidrita (y algunos otros óxidos e hidróxidos de hierro) liberan los iones Fe^{2+} , lo cual se considera el proceso esencial para producir iones solubles de Fe^{2+} en el suelo. La deshidratación parcial y la reducción de ferrihidrita a magnetita tomará lugar finalmente en presencia de un exceso de Fe^{2+} , dando lugar al aumento en los valores de las propiedades magnéticas del suelo.

2.4.1. Características del Suelo debido a Actividades Antrópicas

Además de los procesos naturales, las actividades humanas también heredan ciertas características al suelo. Hay una gran variedad de actividades antrópicas que están en relación directa con el suelo, pero la más influyente durante la historia de la humanidad ha sido la agricultura y todas las demás actividades derivadas de ella, sean el arado, la quema, el riego, la fertilización y la deforestación.

Varios trabajos intentan demostrar y explicar cómo las actividades humanas imprimen una señal que puede ser detectada mediante técnicas de magnetismo de rocas. Los procesos pedogenéticos modifican en diversas formas las propiedades magnéticas del suelo, y puesto que los factores determinantes de la pedonénesis (clima, relieve, vegetación, material parental, tiempo de desarrollo) pueden ser modificados por las actividades humanas, entonces éstas también influyen en las propiedades

magnéticas.

Se pueden detectar actividades constructivas mediante caracterización magnética gracias a que los humanos hacen una selección de los materiales que ocupan para esto, los cuales son distinguibles del entorno natural (ej.: Becker and Fassbinder, 1999). También las actividades funerarias dejan una señal magnética, ya que la práctica de cremación en algunas culturas deja un rastro de minerales ferromagnéticos producidos durante la combustión (ej.: Marshall, 1998), o en el caso de los entierros, se puede detectar un cambio en la señal magnética debido a la adición de sustrato orgánico que proporciona el cuerpo en descomposición, lo cual modifica localmente las condiciones del suelo; aquí se puede presentar la acción de las bacterias magnetotácticas que sintetizan partículas SP de magnetita (Linford, 2002). Pero estos procesos son muy localizados y sólo son útiles para estudios muy puntuales.

También hay estudios sobre fenómenos que afectan a zonas más extensas; por ejemplo, la contaminación ambiental actual debida a la quema de combustible fósil en la industria y los vehículos automotores, en la cual se producen partículas magnéticas en los residuos de la combustión. Estos estudios se realizan midiendo las propiedades magnéticas de los residuos depositados ya sea en el suelo o en las hojas de la vegetación circundante a zonas industriales y urbanas. Las mediciones magnéticas se realizan en paralelo a la determinación de metales pesados, ya que con la información conjunta se puede establecer la diferencia entre un aumento en la susceptibilidad magnética ya sea debido a contaminación, por pedogénesis o litogénica (Fialová et al., 2006).

En el caso de actividades agrícolas hay varios trabajos que intentan describir la relación entre la ocupación humana y la formación del paisaje. Como en el caso del trabajo de Huang *et al.* (2002), en el cual se estudia una secuencia de loess y paleosuelos que muestra un uso del suelo como tierra de arado desde el Holoceno Medio; mediante el uso de parámetros magnéticos junto con la determinación del contenido de carbono orgánico total (TOC) y $CaCO_3$ se logra hacer una distinción de los periodos de ocupación del suelo y asociarlos con la dinámica de deposición de loess en la zona, relacionada con los cambios de régimen de lluvias monzónicas del Pacífico. Otro caso es del trabajo de Parker *et al.* (2008), en el que se estudia un suelo en un valle aledaño al río Támesis en el sureste de Inglaterra que presenta ocupación desde la Edad de Bronce, y mediante el uso de varios parámetros magnéticos aunados a técnicas de estudio sedimentológicas y paleobotánicas se logra determinar cómo el cambio de uso en el suelo de arado a pastoreo, la deforestación de zonas aledañas y la construcción de canales de riego han cambiado la dinámica de sedimentación en el valle a lo largo del tiempo.

Por lo anterior, podemos decir que las técnicas del magnetismo de rocas, además de ayudar en los estudios de contaminación y paleoambientes, también son aplicables a estudios en los cuales se pretende conocer cómo las actividades del hombre a lo largo de los años han influido en el desarrollo del suelo y en la dinámica geomorfológica. Cabe destacar que cada caso tiene condiciones específicas, por lo cual se debe abordar el problema tomando consideraciones especiales para cada caso. Las técnicas del magnetismo por si solas difícilmente resuelven un problema, pero sí pueden dar indicios para encontrar la solución.

3 | Materiales y Métodos

3.1. Paleosuelos de La Playa, Sonora

3.1.1. Marco Geográfico

La zona de estudio se encuentra en el estado de Sonora, dentro de la provincia fisiográfica del Desierto de Sonora, la cual se extiende a lo largo de la frontera con Arizona: en el este, desde el río Colorado hasta Nogales, y en el sur, hasta la cuenca del Yaqui. Esta región incluye tanto la costa del Golfo de California, como la planicie costera y se caracteriza por presentar una vegetación de tipo matorral desértico, compuesta principalmente por mezquite, palo verde, nopales, choyas, ocotillos y sahuaros (Brown, 1994); y un clima semiseco cálido con lluvias en verano.

La zona arqueológica de La Playa (SON F:10:3) se localiza en las cercanías del pueblo de Trincheras, en el municipio del mismo nombre, a una altitud de 515 msnm. Se extiende en un área de aproximadamente 12 km^2 , dentro de la cuenca del río Boquillas, sobre un abanico aluvial que se forma al piedemonte de la Sierra de Boquillas (Figura 3.2).

Con respecto a la geología del sitio, los lomeríos aledaños asociados al abanico aluvial se componen de rocas sedimentarias plegadas, como limolitas, areniscas y conglomerados del Jurásico, en las partes altas, y por conglomerados del Terciario en las partes bajas. El abanico está compuesto por sedimentos aluviales del Cuaternario, derivados de las rocas jurásicas y terciarias, pero también de rocas metamórficas más antiguas, que se encuentran en las sierras más altas (McLaurin et al., 2007).

3.1.2. Marco Cultural

En la zona se han estudiado una gran cantidad de elementos arqueológicos, cuya cronología se ha dividido en cuatro periodos: Pleistoceno terminal (ca. 12,500-8,500 A.P.), Holoceno temprano (8,500-5,500 A.P.), Holoceno medio (5,500-2,500 A.P.) y Holoceno tardío (2,500 A.P.-1,800 A.P.).

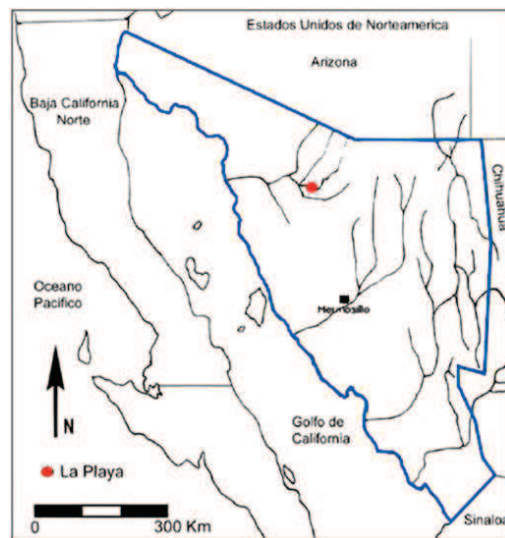


Figura 3.1: Mapa del Estado de Sonora en donde se muestra la ubicación del sitio de La Playa con un punto rojo.

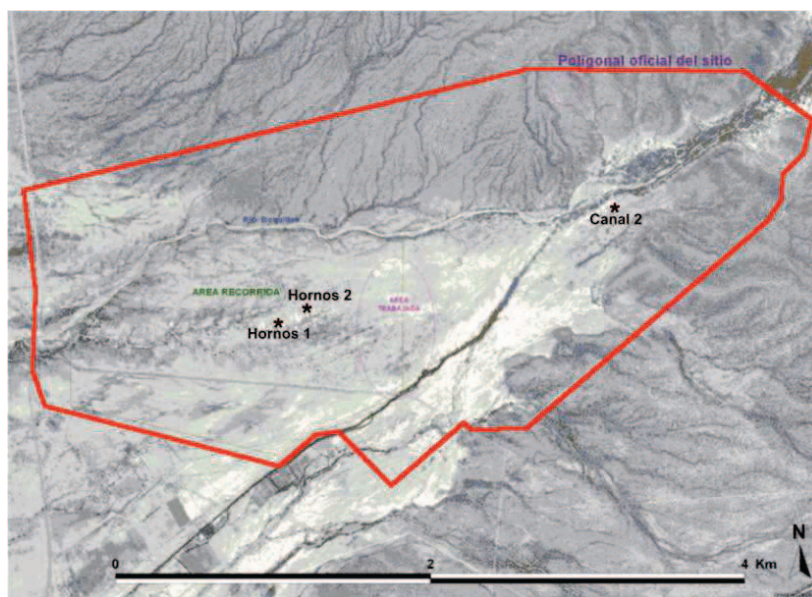


Figura 3.2: Polígono oficial de la zona arqueológica de La Playa, en esta figura se marca la ubicación de los perfiles Hornos 1, Hornos 2 y Canal 2. (Cruz y Cruz, 2011:45, modificado de Villalpando y Carpenter, 2004)

En el Pleistoceno terminal, los principales elementos arqueológicos son puntas de proyectil y percutores de asta fosilizados, asociados con la cultura Clovis (Sánchez, 2010; Sánchez y Carpenter, 2013). El Holoceno medio se considera un periodo altitermal, y la ausencia de material arqueológico se ha interpretado como indicador de condiciones inhóspitas en la zona (Mabry et al., 2011; Carpenter y Sánchez, 2013); es posible que La Playa haya tenido ocupación intermitente. Para el Holoceno tardío la ocupación en la zona se incrementó considerablemente, lo cual sugiere un regreso a condiciones climáticas más favorables.

Es en este periodo se inicia la llamada Agricultura Temprana, alrededor de 1,500 a.C., la cual se caracteriza por la presencia de maíz, conjuntos de casas en foso, canales de riego y manufactura de ornamentos de concha (Sánchez, 2010). La gran mayoría de los entierros encontrados en el sitio pertenecen a este periodo; éstos se encuentran distribuidos por todo el abanico aluvial y están asociados a sitios de actividades cotidianas. También se han documentado una gran cantidad de hornos (más de 1,300), lo que los convierte en el elemento arqueológico predominante en el sitio.

3.1.3. Caracterización de los Perfiles de La Playa

Los tres perfiles incluidos en este trabajo han sido estudiados con detalle desde el punto de vista paleopedológico por Cruz y Cruz (2011), por lo que aquí sólo se hace una breve descripción de las características predominantes. Cabe mencionar que los perfiles Hornos 1 y Hornos 2 forman un perfil compuesto en el que Hornos 1 corresponde a la parte inferior y Hornos 2 a la Superior.

Perfil Hornos 1

El perfil Hornos 1 se encuentra en la parte central del abanico aluvial, en la pared de una gran cárcava. Sus coordenadas geográficas son: N 30° 29' 58"; O 111° 31' 44.6", a 510 msnm. Aquí se identificaron tres ciclos pedológicos en un corte en el terreno hasta una profundidad de 2.65 m (Figura 3.3). La capa superior está constituida por un sedimento limoso de 40 cm de espesor el cual se designó como un horizonte 4C. El siguiente ciclo pedológico corresponde a un paleosuelo con desarrollo de moderado a bueno, constituido por un horizonte 5Bw, el cual presenta rubificación (es decir que está enrojecido) y un horizonte 5BCk. El horizonte 5A de este suelo no se encontró en este perfil pero se identificó en otra parte del corte. El tercer ciclo pedológico se caracteriza por un paleosuelo con propiedades gléyicas y acumulación de carbonatos, en él se encuentran los horizontes 6Bgk y 6BCgk. Subyacentes a este par de paleosuelos se encuentra una secuencia de sedimentos diversos, como gravas, arenas y limos, de origen fluvial (Cruz y Cruz, 2011). A este pedocomplejo se le ha


	Horizonte	Espesor (cm)	Características / observaciones
4440 -4250 Cal A.P.	4C	0 – 40	Color en seco 10 YR 7/3 <i>pardo muy pálido</i> y en húmedo 10 YR 5/3 <i>pardo</i> , textura limosa, consistencia en seco: duro, color gris, su matriz no efervesce al HCl, pero en la parte inferior hay concreciones vermiformes que sí efervesce (últimos 2-3 cm), textura franco-limosa, contacto claro y plano.
	5Bw	40 – 80	Color en seco 7.5 YR 5/4 <i>pardo</i> y en húmedo 7.5 YR 4/6 <i>pardo fuerte</i> , textura areno-arcillosa, estructura en bloques subangulares pequeños, consistencia en seco: duro, matriz un poco más arcillosa que no efervesce al HCl, pocas formas vermiformes que sí efervesce; textura franca, contacto gradual e irregular.
	5Bck	80 – 115	Color en seco 7.5 YR 7/3 <i>rosa</i> y en húmedo 7.5 YR 5/3 <i>pardo</i> , estructuras en bloques subangulares gruesos, consistencia en seco: duro, más arenoso. Muestra fuerte reacción al HCl, textura franco-limosa, el contacto es claro e irregular.
14910- 14230 Cal A.P.	6Bgk	115 – 160	Color en seco 7.5 YR 7/2 <i>gris rosado</i> y en húmedo 7.5 YR 5/3 <i>pardo</i> , estructura en bloques pequeños bien desarrollada, consistencia en seco: duro, manchas de Mn, la matriz no efervesce al HCl, carbonatos en tubos y concreciones, duros; textura franco-limosa, contacto gradual e irregular.
	6BCg	160 – 175	Color en seco 10 YR 7/3 <i>pardo muy pálido</i> y en húmedo 10 YR 5/3 <i>pardo</i> , estructura en bloques grandes, en algunas partes aún conserva laminación, textura franco-limosa, consistencia en seco: duro, concreciones pequeñas y escasas de Fe y Mn, fuerte efervescencia en toda la matriz, con pocas formas vermiformes de carbonatos. Contacto difuso.
	6C	175 – 190	Color en seco 10 YR 6/3 <i>pardo pálido</i> y en húmedo 10 YR 4/4 <i>pardo amarillento oscuro</i> , muchos carbonatos en la matriz, textura franco-limosa, consistencia en seco: duro. Contacto: claro y plano.

Figura 3.3: Descripción de las características de los horizontes del perfil Hornos 1 en La Playa. (Cruz y Cruz, 2011)

denominado Paleosuelo San Rafael (**PSR**) (Cruz *et al.*, 2014).

Perfil Hornos 2

Este perfil se ubica en la parte central del abanico aluvial, en un relieve plano a unos metros del perfil anterior. El perfil se ubica sobre el sedimento limoso, denominado horizonte 4C en Hornos 1. En consecuencia, esta secuencia es más joven. Sus coordenadas geográficas son: N 30° 30' 1.9"; O 111° 31' 42.7", a una altitud de 514 msnm. Se describió un pedestal en el que se observan una serie de suelos con bajo grado de desarrollo (Figura 3.4). La capa superior es material sedimentario limo-arenoso, denominado horizonte C; debajo de éste se observó un suelo cumúlico profundo, de 200 cm, que muestra los horizontes 2AC/3ACk/3Ck/4C (Cruz y Cruz, 2011). Estos suelos de poco desarrollo son fluvisoles, que en conjunto integran lo que informalmente se ha llamado Paleosuelo Boquillas (**PB**)



Horizonte	Espesor (cm)	Características/observaciones
C	0 – 20	Color en seco 10 YR 6/3 <i>pardo pálido</i> y en húmedo 10 YR 4/2 <i>pardo grisáceo oscuro</i> , textura franco-arenosa, compactado, consistencia en seco: duro, fuerte efervescencia con HCl, laminado, fracturado verticalmente. Contacto claro y plano
2A	20 – 70	Color en seco 7.5 YR 6/2 <i>gris rosado</i> y en húmedo 7.5 YR 4/2 <i>pardo</i> , textura franco-limosa, estructura en bloques subangulares pequeños y granular, consistencia en seco: duro, carbonatos vermiculares finos pero abundantes, con fuerte reacción al HCl. En la parte inferior del horizonte, es más claro y los bloques más gruesos. Contacto difuso e irregular.
3A	70 – 110	Color en seco 7.5 YR 6/2 <i>gris rosado</i> y en húmedo 7.5 YR 4/2 <i>pardo</i> , textura franco-limosa, estructura bien desarrollada en bloques angulares gruesos, consistencia en seco: duro, carbonatos vermiculares frecuentes, reacción fuerte al HCl en los carbonatos secundarios, débil en la matriz. Muy poroso. Contacto difuso e irregular.
3C	110 – 160	Color en seco 10 YR 6/3 <i>pardo pálido</i> y en húmedo 10 YR 4/2 <i>pardo grisáceo oscuro</i> , muy compactado, textura franca, poco estructurado, consistencia en seco: duro, efervesce con HCl, formas vermiculares menos frecuentes, delgadas, poroso, menos que horizonte anterior. Contacto difuso e irregular.
4C	160 – 200	Color en seco 10 YR 7/3 <i>pardo muy pálido</i> y en húmedo 10 YR 5/3 <i>pardo</i> , textura franco-limosa, consistencia en seco: duro, no efervesce en la parte superior, pero si en la inferior, aunque ligeramente. En contacto con el suelo pardo San Rafael (Hornos 1)

Figura 3.4: Descripción de las características de los horizontes del perfil Hornos 2 en La Playa. (Cruz y Cruz, 2011)

Perfil Canal 2

Este perfil se localiza en la boca del Río Boquillas. Sus coordenadas geográficas son: N 30° 30' 22.8"; O 111° 30' 29.1", a 524 msnm. Se describió un corte del terreno hasta una profundidad de 4.1 m. Se trata de una secuencia pedosedimentaria. Sobre el sedimento aluvial se formó un suelo policíclico profundo (de 65 a 325 cm) formado por una secuencia de horizontes AC, desarrollados a partir de materiales coluvio-aluviales, erodados de las partes de mayor elevación. En este perfil, los materiales muestran un desarrollo incipiente, característico de un suelo cumúlico. Sobre este suelo se encuentra una capa de sedimento quemado, posiblemente debido a la ocupación humana (Cruz y Cruz, 2011).

3.2. Paleosuelos de Teotihuacan

3.2.1. Marco Geográfico

El valle de Teotihuacan se encuentra al norte de la cuenca del Valle de México, rodeado por varios cerros y sierras originados a partir de la actividad volcánica que ha ocurrido desde el Plioceno y hasta el Holoceno (Vázquez and Jaimes, 1989). Al norte está limitado por el Cerro Gordo, un estratovolcán andesítico-basáltico con lavas y escorias interestratificadas; al sur limita con la Sierra de Patlachique, un domo pliocénico de lavas ácidas; al este con el Cerro de Soltepec, el cual presenta los depósitos de obsidiana que afloran en Otumba; y hacia el suroeste está abierto a una planicie que confluye con la zona del lago de Texcoco. El valle tiene una ligera pendiente de noroeste a sureste, debido en parte a un flujo de lahar (Hernández, 2007).

El valle de Teotihuacan presenta suelos originados por la alteración de rocas ígneas y por el intemperismo de materiales aluviales y coluviales, los cuales están limitados por tepetates. En la base de las laderas y cerca de la llanura aluvial hay suelos antrópicos cubiertos por material aluvial y coluvial que constituyeron terrazas agrícolas en los periodos Formativo y Clásico. En la llanura aluvial predominan suelos modernos a los cuales subyacen suelos teotihuacanos y paleosuelos sobre tepetate (Solleiro-Rebolledo et al., 2011; Sánchez et al., 2013), mientras que en las partes altas de los cerros se localizan Luvisoles sepultados o en superficie, Pheozems (Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2006).

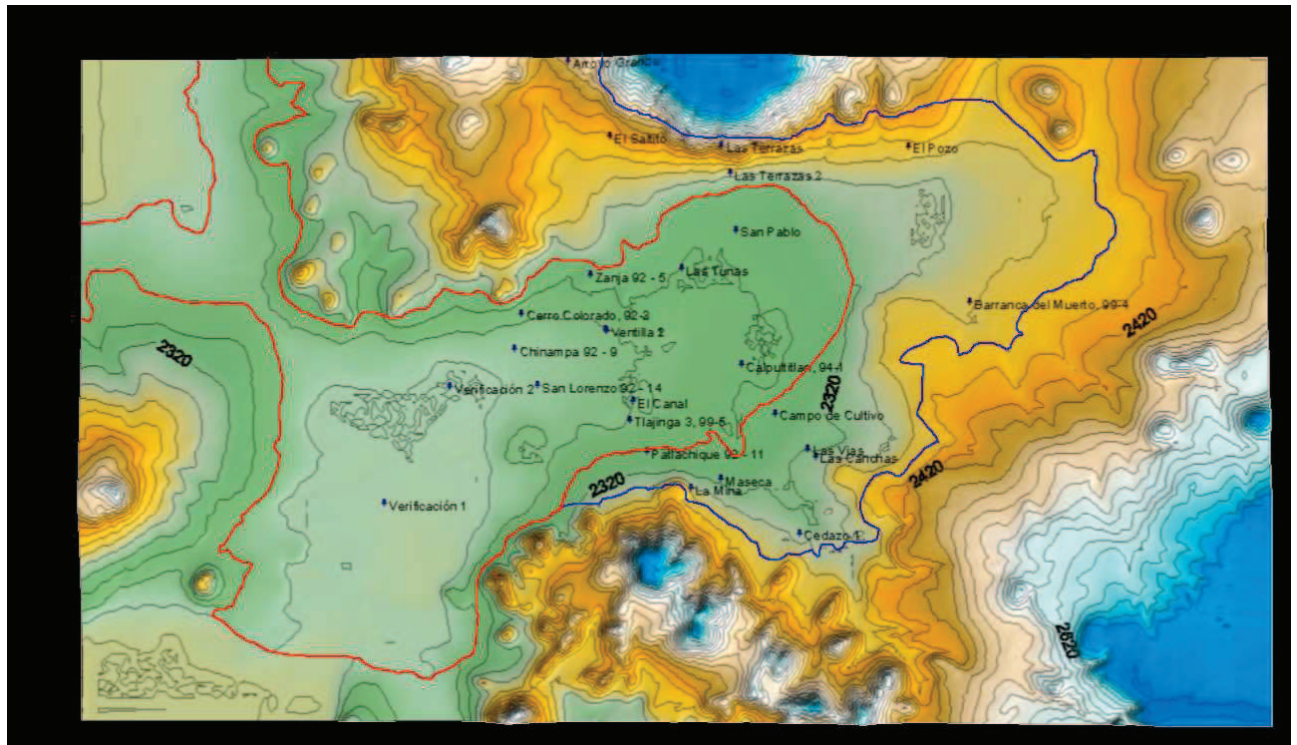


Figura 3.5:
Vista del Valle de Teotihuacan, en esta figura se marca la ubicación del perfil San Pablo. (Solleiro-Rebolledo et al., 2011)

3.2.2. Marco Cultural

Los aspectos culturales de la zona del Valle de Teotihuacan son de gran importancia, puesto que la intensidad con la que se han llevado a cabo las actividades económicas y constructivas a lo largo de un amplio periodo de ocupación humana ha tenido un gran impacto en la evolución del paisaje y las condiciones ambientales de la región. Las diferentes fases de desarrollo de la urbe teotihuacana se pueden ubicar entre los periodos principales de la historia mesoamericana, los cuales son: el Formativo, el Clásico, el Epiclásico y el Postclásico.

Es durante el Formativo Tardío (500 - 200 a.C.) que se presentan las primeras ocupaciones sedentarias en el Valle de Teotihuacan, con varias fases de desarrollo (Sanders *et al.*, 1979).

El periodo Clásico (100 - 650 d.C.) comprende las fases Miccaotli (100 - 250 d.C.), Tlamimilolpa (200 - 350 d.C.), Xolalpan (350 - 550 d.C.) y Metepec (550 - 650 d.C.) (Rattray, 1981). Se cree que durante la fase Miccaotli se llevó a cabo el trazo de la Calzada de los Muertos y la construcción de la pirámide de la Serpiente Emplumada; poco después la población del valle se reagrupó en torno a la calzada. Para la fase Tlalmimilolpa se inició el crecimiento urbano y aparecieron elementos de planificación, viviendas multifamiliares, barrios foráneos, la canalización del Río San Juan para adaptarlo a la retícula urbana y el trazo de un sistema de drenaje subterráneo (Cabrera, 2005). Durante la fase Xolalpan se da el máximo esplendor de la ciudad, la cual tiene relaciones comerciales con toda Mesoamérica debido a una gran demanda de productos suntuarios y rituales. Durante esta fase también se da la caída de la ciudad. Se cree que la demanda de madera usada como combustible para fabricar la cal, así como para elementos constructivos, extraída probablemente de las partes altas de las sierras que bordean el valle, causó procesos erosivos que azolvaron presas y canales e impidieron la recarga de los acuíferos, provocando malas cosechas y desabasto de agua para la población, lo cual ocasionó una etapa de inestabilidad social y política que culminó en la destrucción y abandono de partes de la ciudad. Hay evidencias de remodelación en la fase Metepec, pero la ciudad no volvió a recuperar su antiguo esplendor, y fue abandonada paulatinamente.

Durante el Epiclásico (650 - 900/1000 d.C.) se da la fase Coyotlatelco (Rattray, 1981), la cual se caracteriza por la presencia en la zona de pequeños grupos posiblemente procedentes del centro-norte de México, quienes probablemente se encontraban saqueando los remanentes de la ciudad. En el Postclásico continuó la presencia de pequeños grupos que vivieron en aldeas en el valle durante las etapas Mazapa/Tolteca (900 - 1150 d.C.) y Azteca (1300 - 1521 d.C.).

3.2.3. Caracterización del Perfil San Pablo

El perfil San Pablo se encuentra al norte de la zona arqueológica de Teotihuacan, sobre el piedemonte del Cerro Gordo, a la orilla de un canal por donde corre el Río San Pablo. Sus coordenadas geográficas son N 19° 42' 30.9"; O 98° 49' 15.2", y se encuentra a una altitud de 2303 msnm. Este perfil ha sido estudiado con detalle por Rivera *et al.*, (2007) y Sánchez *et al.*, (2013). Tiene una profundidad de 310 cm y está constituido por una serie de paleosuelos con algunas características diferentes entre ellos (Figura 3.6). La diferencia más marcada está entre los cuatro ciclos pedológicos ubicados en la parte superior del perfil con respecto al que se encuentra en la parte inferior. Los primeros cuatro ciclos pedológicos (más jóvenes) se caracterizan por un débil desarrollo sobre una serie de depósitos aluviales con mayor abundancia de la fracción granulométrica gruesa (arenas y limos). Estos ciclos pedológicos son una serie de Luvisoles que comprenden hasta los 180 cm de profundidad en el perfil y su horizontalización se ha desarrollado de la siguiente forma: Ap - C - 2A - 2AC - 2C - 3A - 3C - 4A - 4C.

En la parte inferior del perfil, el ciclo pedológico 5 se caracteriza por mostrar un mejor desarrollo con una horizontalización que se presenta de la siguiente forma: 5AE - 5ABtss - 5Bk - 5Ck. El paleosuelo posee un alto contenido de arcilla, una estructura en bloques angulares y acumulación de materia orgánica, con fuertes propiedades vérticas, y demuestra ocupación durante la época teotihuacana (Rivera *et al.*, 2007). Sánchez *et al.*, (2013) lo denominaron Paleosuelo Negro San Pablo (**PNSP**), el cual se puede encontrar en varias partes tanto en el fondo del valle como en los piedemontes de las sierras circundantes. Se considera que este suelo fue intensivamente usado para la agricultura y la construcción y que representa un marcador estratigráfico de la ocupación teotihuacana (Sánchez *et al.*, 2013).

3.3. Metodología

El muestreo de los perfiles de suelo considerados para el análisis de sus propiedades magnéticas se hizo cada 10 cm. Se les dio a las muestras un tratamiento de secado al aire, después se molieron suavemente para llenar cubos de acrílico de 8 cm³ de volumen, en donde se empaquetaron lo más compacto posible para evitar en cierta medida el movimiento de los agregados dentro del cubo.

Se midió la susceptibilidad de cada una de las muestras en un susceptibilímetro Bartington modelo MS2 y un sensor dual MS2B, el cual aplica un campo magnético alterno de baja intensidad (alrededor de 0.1 mT), y mide la susceptibilidad en dos frecuencias, una baja (0.47 kHz) y otra alta (4.7 kHz); esto permite calcular la

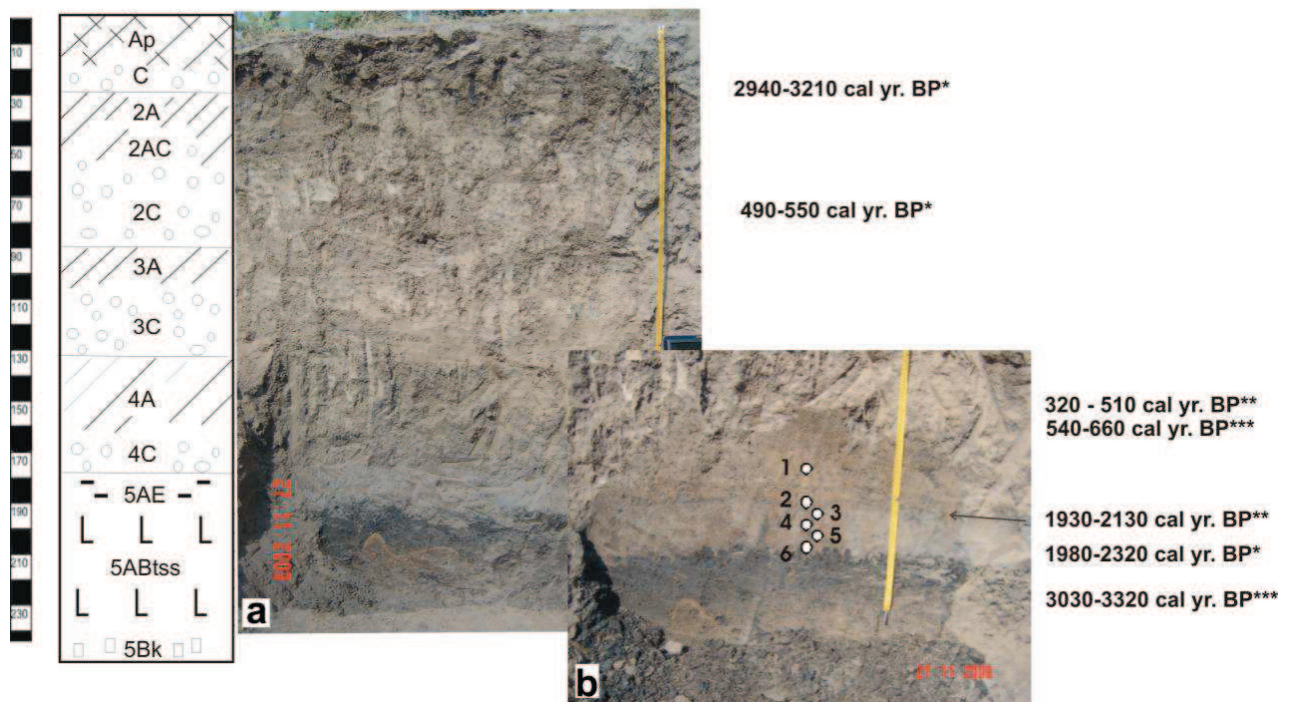


Figura 3.6: Esquema de los horizontes que componen el perfil San Pablo en el Valle de Teotihuacan. (Tomado de Sánchez *et al.*, (2013))

susceptibilidad dependiente de la frecuencia χ_{fd} que es una forma de estimar la concentración de partículas SP en la muestra, cuyo origen, generalmente, se asocia a procesos pedogenéticos. Por su parte, la susceptibilidad a baja frecuencia χ_{lf} nos da una idea de la concentración relativa de minerales ferrimagnéticos entre los horizontes del perfil.

Después se midió la NRM de las muestras en un magnetómetro Molspin Mini-spin; cabe mencionar que el valor de ésta es relevante para datos paleomagnéticos, pero, ya que nuestras muestras no están orientadas, esta medida sirve en este trabajo sólo como punto de partida para conocer las condiciones iniciales del material. Posteriormente se les aplicó ARM en un desmagnetizador por campos alternos Molspin, primero con un campo alterno de 40 mT y después de 100 mT, ambos en presencia de un campo constante de 50 μT . La adquisición de ARM es un buen indicador del contenido de minerales ferrimagnéticos de tamaño de dominio fino (SD).

Posteriormente, se desmagnetizaron las muestras para comenzar con una nueva adquisición, en este caso de IRM (Magnetización Isotermal Remanente) a diferentes campos directos de valores entre 10 y 1000 mT, para lo cual se usó un magnetizador de impulsos ASC Scientific modelo IM-10. IRM a 1000 mT se tomó como SIRM, y a continuación se procedió a aplicar de nuevo campos en la dirección contraria, comenzando por 10 mT y aumentando de 10 en 10 hasta encontrar el valor de H_{cr} , y después aplicando 100, 200 y 300 mT; esto con el fin de conocer la coercitividad de las partículas magnéticas presentes en las muestras, es decir, que es un indicador del tipo de mineral magnético.

Para tener una mayor certeza de la mineralogía magnética a la cual se debe la magnetización, se hicieron pruebas termo-magnéticas a algunas muestras seleccionadas de cada horizonte, estas pruebas consisten en calentar las muestras hasta una temperatura lo suficientemente alta como para alcanzar la temperatura de Curie de los componentes magnéticos que contiene. Las muestras se calentaron hasta 700°C en un controlador de temperatura Bartington, midiendo cada grado centígrado la κ con un susceptibilímetro Bartington MS2. La temperatura de Curie se estimó de forma gráfica, al observar en la curva $\kappa vs T$ a qué temperatura hay una gran pérdida en el valor de la susceptibilidad. Posteriormente se deja enfriar mientras se sigue midiendo la susceptibilidad, ya que la curva $\kappa vs T$ de enfriamiento nos muestra cambios que sufren los minerales magnéticos al ser calentados. La reversibilidad o irreversibilidad de esta curva nos habla de la estabilidad de los minerales magnéticos.

4 | Análisis y Discusión de Resultados de La Playa

4.1. Resultados de La Playa

En el caso de los tres perfiles de La Playa, se obtuvieron distintos comportamientos en las propiedades analizadas: susceptibilidad magnética en alta y baja frecuencia, susceptibilidad dependiente de la frecuencia, magnetización remanente anhisterética a 100 mT. Como los valores de estos parámetros para el perfil Canal 2 resultaron ser bajos y no presentan alguna tendencia definida, no se continuó con la medición de más parámetros. En los perfiles Hornos 1 y Hornos 2, los valores de χ_{lf} y ARM presentaron un comportamiento más complejo, por lo cual, para tener más información sobre su comportamiento magnético, se midió IRM para los perfiles completos y se obtuvieron curvas de κ vs T y ciclos de histéresis en algunas muestras seleccionadas.

4.1.1. Parámetros magnéticos del perfil Hornos 1

El perfil Hornos 1 muestra el comportamiento magnético más complejo. Cada uno de los ciclos pedológicos se diferencian por los valores de χ_{lf} , y por algunos otros parámetros. El horizonte 4C, que corresponde a la capa superior de sedimentos aluviales limosos, presenta un ligero aumento de χ_{lf} y de SIRM en la superficie, y después decrece rápidamente hacia la parte baja de esta capa; con respecto a los demás parámetros, el comportamiento es más o menos homogéneo y no se observa algún incremento importante. El **PSR** presenta los valores máximos de χ_{lf} , χ_{fd} , ARM y SIRM en los horizontes 5A y 5Bw (Figuras 4.1 y 4.2), con una disminución notable en el horizonte 5BCk, mientras que en la parte gléyica, los horizontes 6Bgk y 6BCg, presentan los valores más bajos de χ_{lf} y SIRM de todo el perfil; sin embargo, también se observa un aumento en los indicadores de partículas finas y ultra-finas, χ_{fd} , ARM/IRM y ARM/ κ , (Figura 4.2). Para el resto de los horizontes, en los cuales se presenta una débil pedogénesis, se observa un aumento en la susceptibilidad magnética, sobre todo en 6C.

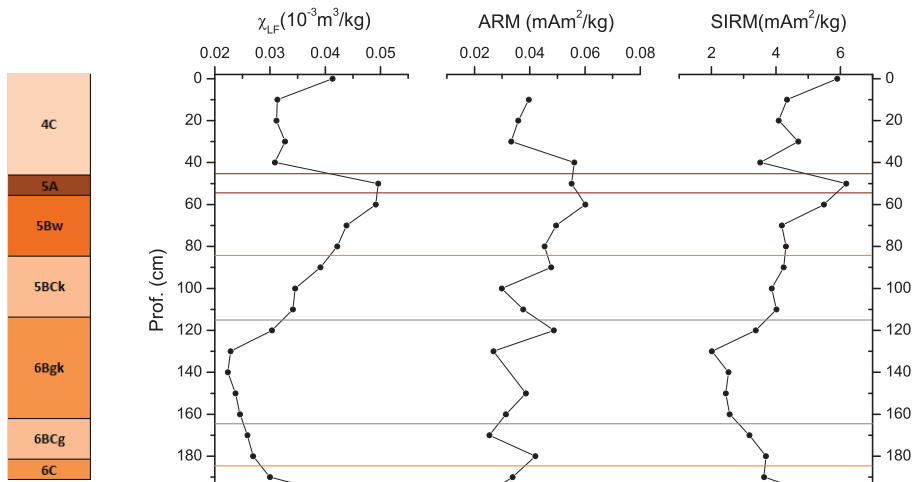


Figura 4.1: Propiedades Magnéticas indicadoras de concentración de minerales magnéticos en los diferentes horizontes del perfil Hornos 1 en La Playa, Son.

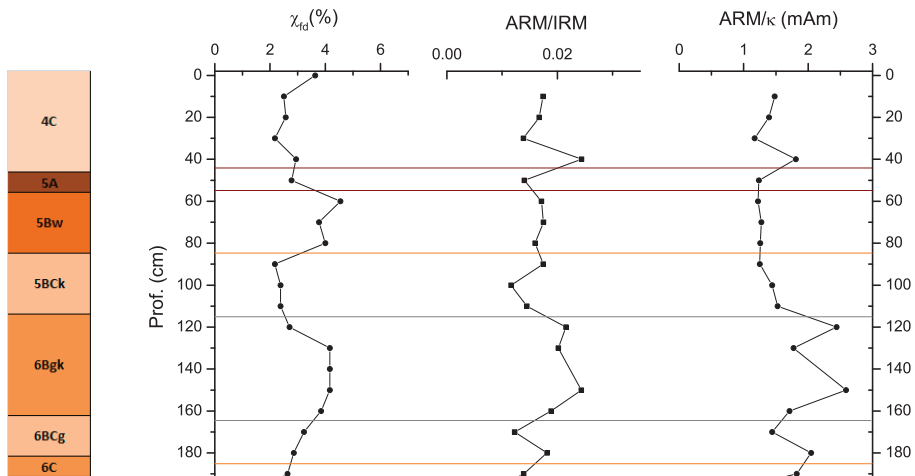


Figura 4.2: Propiedades Magnéticas indicadoras de tamaño de partícula de minerales magnéticos en los diferentes horizontes del perfil Hornos 1 en La Playa, Son.

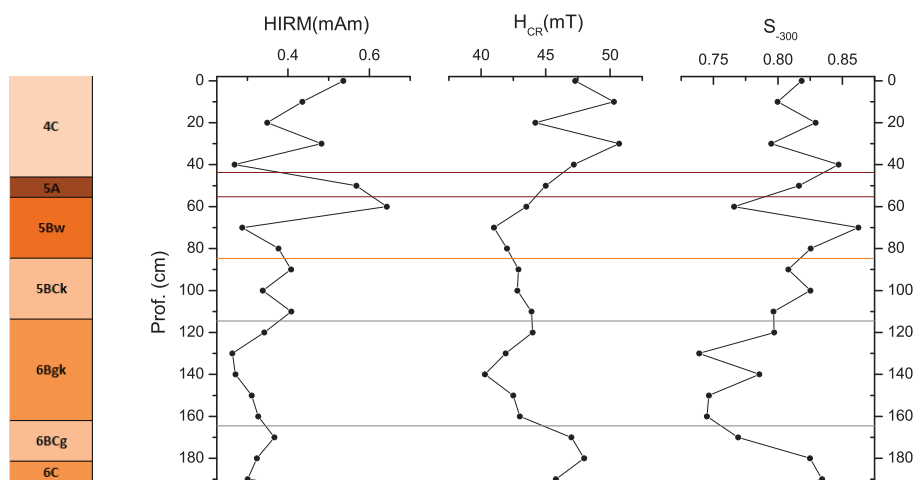


Figura 4.3: Propiedades Magnéticas indicadoras de coercitividad como indicio de mineralogía magnética en los diferentes horizontes del perfil Hornos 1 en La Playa, Son.

4.1.2. Parámetros magnéticos del perfil Hornos 2

Las propiedades magnéticas de Hornos 2 tienen un comportamiento menos complejo que el de Hornos 1, aunque también se obtuvieron resultados interesantes; por ejemplo, la capa superficial de sedimentos aluviales limosos, horizonte C, tiene valores de χ_{lf} y SIRM tan altos como los horizontes 5A y 5Bw del **PSR**, pero no presenta valores altos en los indicadores de partículas finas, como χ_{fd} y ARM/IRM. Por otro lado, el horizonte 2A tiene valores de χ_{lf} altos, aunque menores que los de C, pero en este caso sí se observa un aumento en los parámetros indicadores de presencia de partículas finas y ultra-finas (Figura 4.2). Con respecto a los horizontes 3A, 3C y 4C, los valores de susceptibilidad magnética y de los otros indicadores son bajos y no muestran alguna tendencia que destaque.

4.1.3. Parámetros magnéticos del Perfil Canal 2

Para los diferentes fluvisoles de Canal 2 se encontraron valores bajos de χ_{lf} a lo largo del perfil, diferenciándose únicamente un aumento de este parámetro en la parte baja, compuesta por sedimentos aluviales arenosos y gravosos, denominado horizonte 12C. El comportamiento de χ_{fd} se muestra muy variable, pero esto puede ser solo ruido debido a las valores bajos de χ en ambas frecuencias. Los valores de

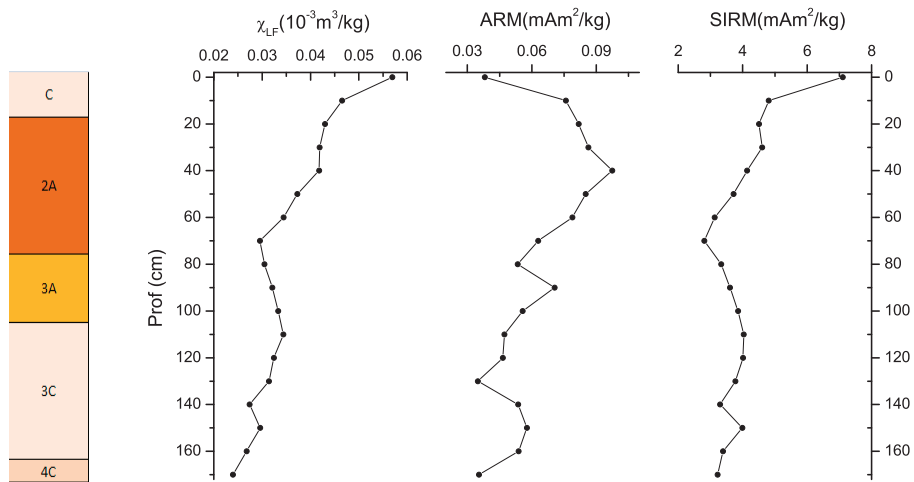


Figura 4.4: Propiedades Magnéticas indicadoras de concentración de minerales magnéticos en los diferentes horizontes del perfil Hornos 2 en La Playa, Son.

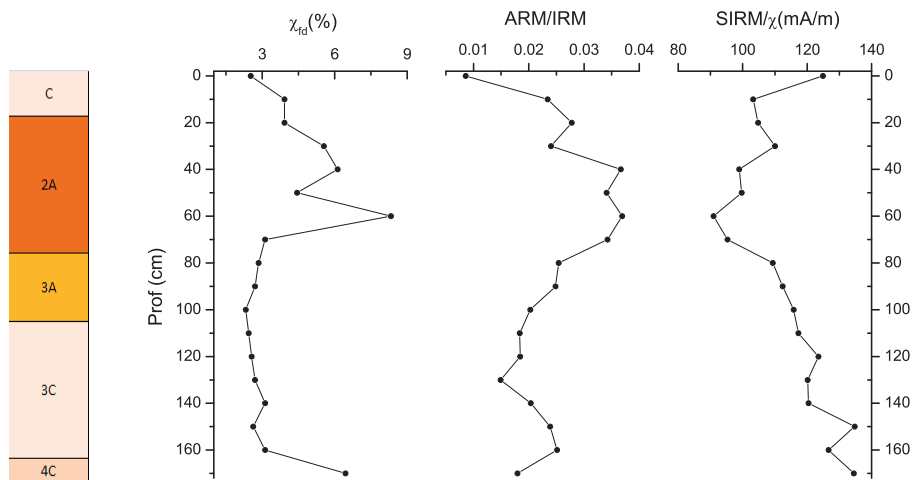


Figura 4.5: Propiedades Magnéticas indicadoras de tamaño de partícula de minerales magnéticos en los diferentes horizontes del perfil Hornos 2 en La Playa, Son.

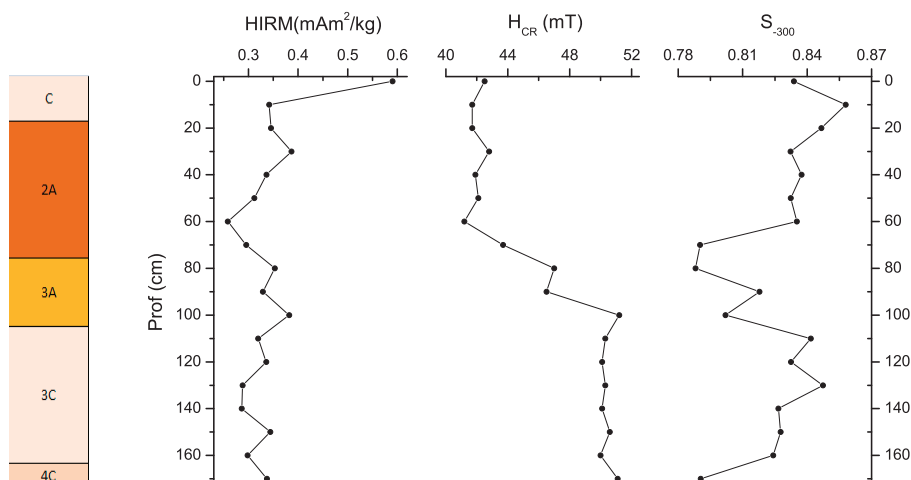


Figura 4.6: Propiedades Magnéticas indicadoras de coercitividad como indicio de mineralogía magnética en los diferentes horizontes del perfil Hornos 2 en La Playa, Son.

ARM también muestran muchas diferencias entre horizontes (Figura 4.7).

4.1.4. Curvas de κ vs T en muestras seleccionadas de la Playa

Con respecto a las curvas κ vs T, todas las muestras seleccionadas presentan una gran pérdida de susceptibilidad magnética durante el calentamiento al alcanzar temperaturas entre los 500 y 550 °C, lo cual indica que la fase magnética dominante es probablemente magnetita, aunque puede tener otras fases como la hematita, ya que se observa que algunas muestras conservan parte de su magnetización por arriba de los 600 °C (Figura 4.8). Otro resultado interesante es que las muestras de los horizontes 2A y 5A, con mayor contenido de materia orgánica, muestran un aumento del doble o triple de κ , con respecto al inicial durante el enfriamiento, lo cual indica que en las muestras contienen fases magnéticas débiles como la hematita y algunos paramagnéticos con hierro, que después de la combustión, en presencia de materia orgánica, sufrieron transformaciones a minerales magnéticos fuertes como la magnetita.

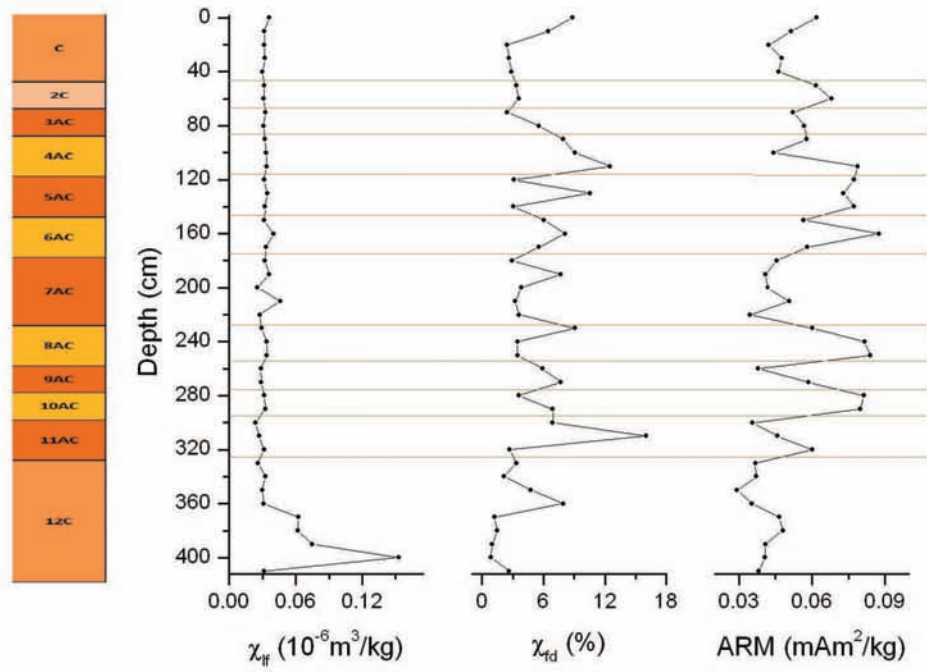


Figura 4.7: Propiedades Magnéticas indicadoras de concentración de minerales magnéticos así como de tamaño de partícula en los diferentes horizontes del perfil Canal 2 en La Playa, Son.

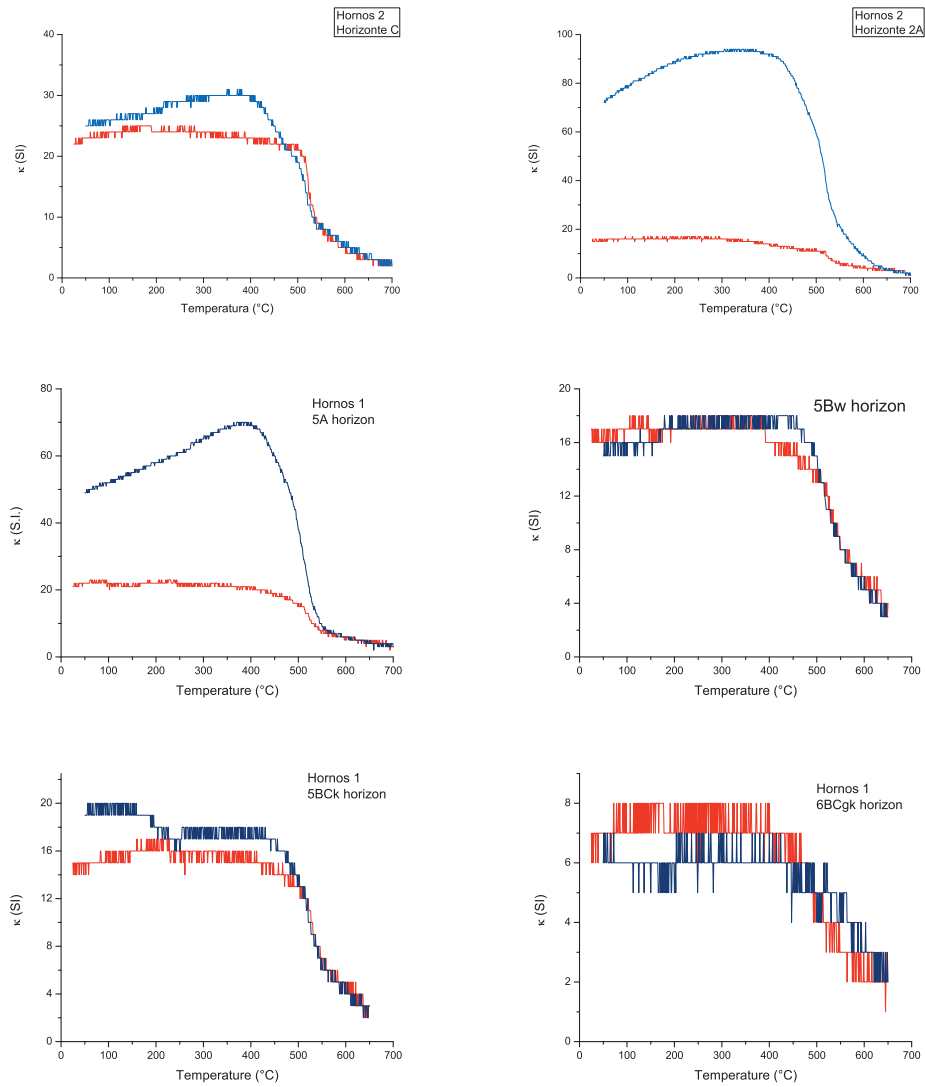


Figura 4.8: Curvas de Susceptibilidad Magnética κ vs Temperatura $T(^{\circ}\text{C})$ de algunos horizontes del perfil Hornos 1 en La Playa, Son. C, 2A, 5A, 5Bw, 5BCk, 6BCgk.

4.1.5. Ciclos de histéresis de muestras seleccionadas

Los ciclos de histéresis en todos los casos presentaron curvas similares, en general son curvas poco amplias, es decir que tienen baja coercitividad, lo cual se corresponde con minerales ferrimagnéticos como la magnetita, también tienen valores bajos de M_{sr} , que indica predominancia de tamaños gruesos de partículas. (Figura 4.9)

4.2. Comportamiento magnético de PSR en La Playa y su relación con los procesos pedogénicos

La diferenciación encontrada en los parámetros magnéticos en el **PSR** es controlada por los procesos de pedogénesis y sedimentación. Cruz *et al.* (2014) documentan que el PSR es un suelo policíclico formado en dos ciclos pedológicos, los cuales documentan diversas condiciones de formación.

El ciclo pedológico más antiguo corresponde con la formación de los horizontes 6Bgk, 6BCgk y 6C. En estos horizontes se encuentra el mínimo de χ_{lf} y de SIRM, lo que señala una disminución en la concentración de partículas magnéticas. Este mínimo va acompañado de un aumento en otras propiedades magnéticas como lo son χ_{fd} y ARM/χ . En consecuencia, aunque la concentración de partículas magnéticas sea baja, la proporción de partículas finas y ultra-finas es importante. La formación de minerales ferrimagnéticos de granos finos y ultra-finos que se encuentran en estos horizontes se asocia con procesos pedogénicos, en particular con los ciclos de oxidación y reducción durante la formación del suelo. El intemperismo de los minerales primarios causa la formación de minerales de tamaño fino y la liberación del hierro, formando óxidos de hierro. Bajo condiciones de gleyzación, en las cuales el espacio poroso del suelo está saturado por agua, se tiene una reducción del hierro a Fe^{2+} , el cual es más soluble y móvil. En consecuencia, se origina una pérdida de minerales magnéticos. Bajo condiciones reductoras también ocurre el ataque de las partículas de óxido de hierro, lo cual provoca que se hagan más finas (Babanin *et al.*, 1999). Este comportamiento magnético ha sido ampliamente documentado en suelos con propiedades gléycas (Jordanova *et al.*, 2013; Solís *et al.*, 2013) o afectados por procesos de óxido - reducción que ocurren en los horizontes eluviales (Terhorst *et al.*, 2001; Ortega *et al.*, 2004; Rivas *et al.*, 2006).

Otro factor que influye en la disminución de la susceptibilidad magnética es la acumulación de carbonatos, cuyo comportamiento diamagnético, contrarresta aún más la señal ferromagnética. Estos carbonatos se precipitan en el suelo, en una etapa

4.2. COMPORTAMIENTO MAGNÉTICO DE PSR EN LA PLAYA Y SU RELACIÓN CON LOS PROCESOS

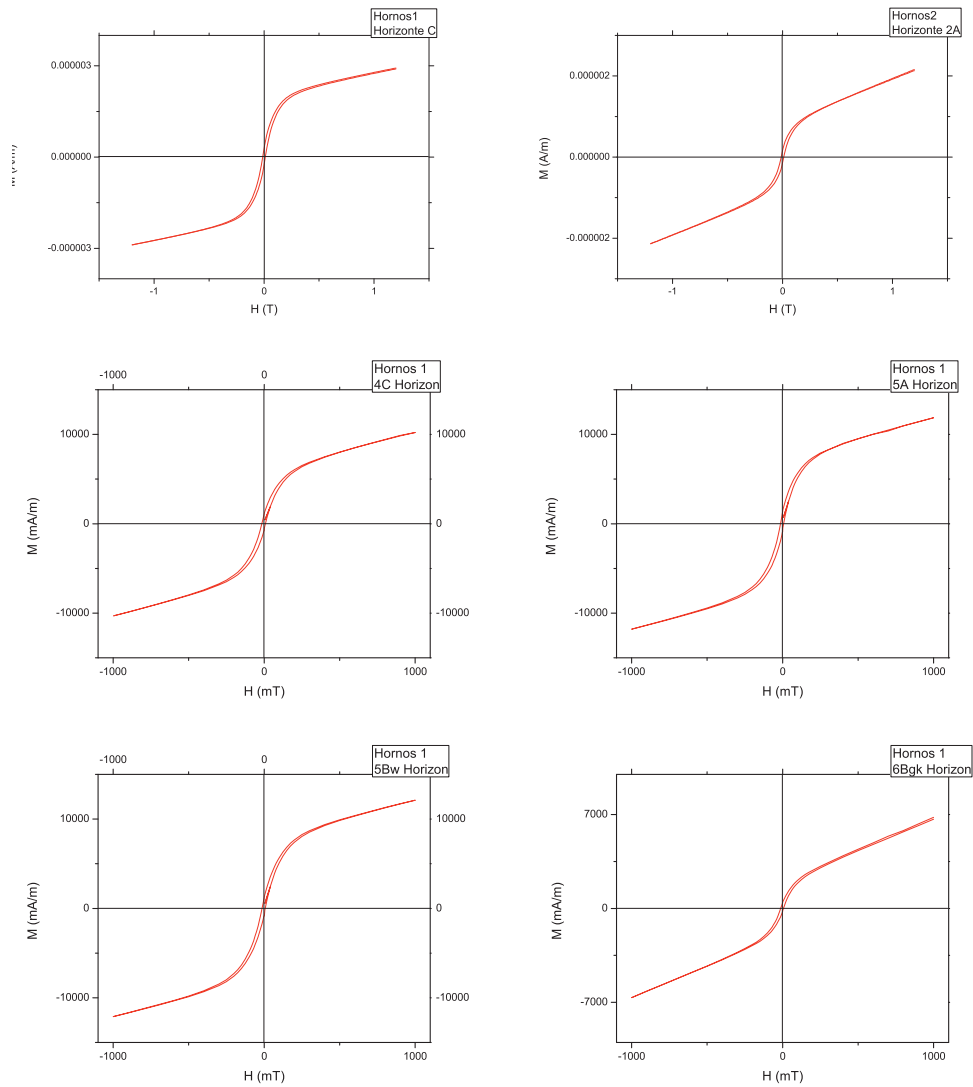


Figura 4.9: Ciclos de histéresis de algunos horizontes de los perfiles Hornos 1 y Hornos 2 en La Playa, Son. C, 2A, 5A, 5Bw, 5Bck, 6Bgk.

posterior a la gleyzación y se considera que se asocian al ciclo pedogenético posterior, es decir a la formación de los horizontes 5A y 5Bw (Cruz *et al.*, 2014), dado que es en este último en donde se tiene un mínimo en el contenido de carbonatos.

El aumento en los valores de χ_{lf} , χ_{fd} , ARM y SIRM en los horizontes 5A y 5Bw indica un incremento en la concentración de minerales ferrimagnéticos de tamaño fino y ultra-fino, probablemente magnetita, como lo sugieren las curvas de κ vs T (Figura 4.8 c y d). La formación de estos minerales en el horizonte 5Bw, se atribuye a los procesos de intemperismo del material parental, y formación *in situ* de óxidos de hierro ferrimagnéticos debido a los procesos pedogenéticos. Cabe mencionar que en estos horizontes se da una disminución en la concentración de carbonatos, ya que se han reprecipitado en los horizontes subyacentes (6Bgk, 6BCgk). Es así que el aumento en los parámetros magnéticos se correlaciona con la ausencia de carbonatos (minerales diamagnéticos) y el aumento en óxidos de hierro ferrimagnéticos. Los resultados de Cruz *et al.* (2014) indican que es en este horizonte en el que se presenta un aumento en el contenido de Fed (hierro extraído con ditionito-citrato-bicarbonato), el cual es un indicador del contenido de óxidos de Fe libres (Schwertmann and Latham, 1986). De esta manera, se puede decir que la migración de los carbonatos no solo contribuye al mínimo de χ_{lf} de los horizontes gléyicos 6Bgk y 6BCgk, sino también al aumento encontrado en los horizontes enrojados, 5A y 5Bw, que además de enriquecerse en óxidos de hierro ferrimagnéticos pierde materiales diamagnéticos.

Con respecto al horizonte 5A, el cual muestra un aumento en la concentración de ferrimagnéticos de tamaño fino y ultrafino, se podría pensar que el patrón en los parámetros magnéticos es debido al típico *enhancement* reportado en diversos trabajos (Liu *et al.*, 1995; Maher *et al.*, 1994; Maher, 1998), sin embargo, en este caso, se considera que existen otros aspectos a considerar. En este horizonte se encontró una cantidad importante de restos de carbón de diferentes tamaños. Es bien conocido que los suelos que sufren quema poseen un incremento en la susceptibilidad magnética, ocasionado por la formación de magnetita durante la combustión (Thompson and Oldfield, 1986; Kletetschka and Banerjee, 1995; Marshall, 1998; Hunt and Premathilake, 2012). En un estudio conducido en suelos de pradera, la señal magnética solo se incrementa bajo los efectos de incendios intensos, en tanto que los moderados no producen cambios en las propiedades magnéticas (Roman *et al.*, 2013). Por lo tanto, podemos inferir que la afectación por fuego en este horizonte ha sido intensa.

El sedimento limoso del horizonte 4C que sepulta al PSR demuestra un valor elevado de χ_{lf} en la superficie (aunque menor que en 5A y 5Bw), relacionado a un aumento en la concentración de partículas ferrimagnéticas pero de tamaño grueso. En estudios de secuencias de paleosuelos sobre loess, los resultados son contrarios, ya

4.3. PARÁMETROS MAGNÉTICOS DEL PB EN LA PLAYA Y SU RELACIÓN CON LOS PROCESOS

que el máximo de susceptibilidad se encuentra en los horizontes A, con un mínimo en C, en donde se tiene un dominio de minerales diamagnéticos y paramagnéticos (Liu *et al.*, 1995; Maher, 1998; Maher *et al.*, 1994). En el caso del PSR, el horizonte 4C muestra un intemperismo débil, por lo que la respuesta magnética se debe a los procesos de sedimentación y no a la pedogénesis. En el caso de las secuencias de paleosuelos volcánicos, los horizontes C exhiben máximos en susceptibilidad, relacionados con una gran cantidad de minerales ferrimagnéticos (Ortega *et al.*, 2003; Rivas *et al.*, 2006, 2012). En el área de estudio, la fuente volcánica más cercana es El Pinacate hacia el Noroeste, sin embargo, su influencia es local, ya que no se han detectado materiales volcánicos en los materiales de La Playa (Cruz, 2011). La Sierra de Boquillas que alimenta el abanico aluvial está compuesta por rocas sedimentarias, conglomerados y areniscas, con clastos de rocas ígneas y una alta concentración de hematita (McLaurin *et al.*, 2007). Cruz (2011) reporta la presencia de minerales volcánicos en las secciones delgadas de este horizonte. Los parámetros relacionados con la coercitividad muestran variaciones en partículas duras y suaves (Figura 4.3). En consecuencia, los sedimentos que componen este abanico son ricos en estos materiales que aportan la fuerte señal encontrada.

4.3. Parámetros magnéticos del PB en La Playa y su relación con los procesos pedogenéticos

En el PB se observa una mayor heterogeneidad en la señal magnética relacionada con los diferentes ciclos pedológicos registrados. Se ha comentado que en el perfil Hornos 2 se observaron 4 ciclos con la formación de los horizontes C-2A-3A-3C-4C (este último corresponde con el 4C sobre el PSR en Hornos 1). Estos horizontes se han clasificado como Fluvisoles y evidencian procesos pedogénicos de corta duración, dando lugar a suelos de poco desarrollo.

El horizonte C, que se encuentra en la superficie es el que posee el valor más alto de susceptibilidad, de todos los materiales analizados. En este caso, se puede asociar nuevamente como en 4C a la contribución de partículas litogénicas procedentes de la denudación de la Sierra de Boquillas. Es probable que el aumento en la susceptibilidad esté relacionado con la erosión actual en la zona que ha movilizó materiales de diversas fuentes e inclusive de los paleosuelos San Rafael y Boquillas.

El primer horizonte 2A también presenta un aumento en la concentración de ferrimagnéticos pero éstos sí son de tamaño fino y ultra-fino, por lo que se pueden correlacionar con procesos pedogénicos. Sin embargo, al tomar en cuenta que el desarrollo de PB es considerablemente menor el de PSR, se debe considerar una explicación diferente para el incremento en la concentración de minerales magnéticos de

tipo SP y SD. La respuesta se puede encontrar en el grado de perturbación antrópica que se registra en Boquillas, especialmente en este horizonte 2A. Es aquí en donde se han encontrado un gran número de entierros y hornos alineados (Villalpando *et al.*, 1999; Sánchez, 2010). Como ya se ha explicado anteriormente, el fuego durante la combustión cambia la mineralogía magnética, convirtiendo algunos minerales paramagnéticos y antiferromagnéticos en ferrimagnéticos. Por otro lado, en las láminas delgadas de estos Fluvisoles, se ha observado la presencia de fragmentos de suelo, retrabajados e incorporados en el material parental, los cuales modifican la señal magnética.

En el perfil Canal 2, la señal magnética es débil en toda la secuencia con contribución de partículas finas y ultrafinas, evidenciando una fuente diferente de sedimentos. Su ubicación en el lado oriental de la Sierra de Boquillas (Figura 3.2), cercano a materiales aluviales depositados en el Neógeno, ricos minerales diamagnéticos como el cuarzo (McLaurin *et al.*, 2007). Únicamente el horizonte inferior 12C, muestra un fuerte incremento en la susceptibilidad, que pudiera explicarse con cambios en la dinámica sedimentaria o bien, por procesos antrópicos. Sin embargo, con la información que se tiene al momento no puede darse una conclusión al respecto.

4.4. Reconstrucción ambiental de La Playa, con base en el magnetismo

Con base en la información presentada, se puede concluir que los patrones magnéticos observados:

- a. Son débiles en relación a los procesos gléyicos y de carbonatación en la base del perfil Hornos 1.
- b. Se intensifican en la parte intermedia del perfil Hornos 1, relacionados con los procesos de intemperismo, rubificación y decarbonatación, y pueden evidenciar también una mayor duración de la pedogénesis.
- c. Son intensos en el horizonte 5A debido a los cambios originados por el fuego, que afecta a la superficie del suelo, antes de su sepultamiento.
- d. Son moderados en el sedimento superficial, 4C, debido a la contribución de partículas magnéticas de carácter litogénico.
- e. Los Fluvisoles presentan un patrón más heterogéneo en Hornos 2. Los horizontes orgánicos revelan un incremento que se puede relacionar a las actividades humanas antiguas, que han causado procesos de erosión, sedimentación, quema y acumulación de materia orgánica.

- f. La diferencia en la señal encontrada en el perfil Canal, marca un cambio en el tipo y procedencia de sedimentos.

De esta manera se observa que los parámetros magnéticos reflejan claramente los procesos pedogénicos y geomórficos, es decir que se asocian con los periodos de estabilidad del paisaje, en los cuales disminuye la erosión y permite el desarrollo de suelos; o, por otro lado, los periodos de inestabilidad en que aumenta la erosión y deposición de sedimentos, impidiendo un desarrollo continuo del suelo.

Cruz *et al.* (2014) proponen que el PSR se forma a finales del Pleistoceno y su pedogénesis ocurre en un lapso prolongado de más de 10,000 años. Esto tomando en consideración los fechamientos proporcionados por los carbonatos del horizonte 6B_{gk}, los cuales dieron edades de 14,200 y 18,800 años AP, y por el carbón encontrado en 5A (4,200-4,400 años AP). Esta última marca el final de la pedogénesis del PSR.

La interpretación de las propiedades del PSR, tanto pedogenéticas como magnéticas, marcan cambios en las condiciones de humedad comparadas con las actuales. Los procesos de gleyzación y la débil señal magnética se producen bajo condiciones de saturación de agua, en tanto que la rubificación y descarbonatación, que originan el aumento en el patrón magnético, se producen en condiciones de humedad, pero no excesiva. Finalmente, el incremento de la susceptibilidad y la presencia de carbón, los cuales se correlacionan con fuegos intensos, podrían indicar la tendencia hacia fases más secas, que ocurren en el Holoceno medio.

En el Holoceno tardío, las propiedades magnéticas se asocian con la mayor dinámica geomórfica que parece obedecer a la fuerte perturbación antrópica, por lo que no se puede hablar de una señal climática.

La reconstrucción paleoclimática esbozada para el PSR coincide con los registros de la zona, que sugieren climas más húmedos en el NW de México y SW de Estados Unidos durante el Pleistoceno tardío (Van Debender, 1990; Thompson *et al.*, 1993), así como cambios abruptos en el Holoceno medio (Booth *et al.*, 2005).

5 | Análisis y Discusión de Resultados de Teotihuacan

5.0.1. Parámetros magnéticos del Perfil San Pablo

El comportamiento magnético del perfil San Pablo presenta dos zonas muy diferenciadas; los valores de χ_{lf} son más altos para los ciclos pedológicos de la parte superior (del Horizonte Ap en superficie al horizonte 3C), que para los de la parte inferior (del Horizonte 4A al 5Bk). También otros indicadores, como ARM, SIRM y los indicadores de tamaño de partícula, muestran un comportamiento diferenciado para estas dos zonas.

Las curvas muestran un aumento de susceptibilidad en los horizontes C de cada uno de los suelos en la parte superior del perfil (C, 2C, 3C), mientras que para los respectivos horizontes A, hay una disminución de ésta (Figura 5.1). En particular el horizonte 3C presenta el máximo aumento en la susceptibilidad. En cuanto a los indicadores de tamaño de partícula, para esta zona, la tendencia es un aumento de χ_{fd} , ARM/IRM y SIRM/ χ en los horizontes A, y una disminución en los horizontes C (Figura 5.2). En lo que respecta a los indicadores de coercitividad, HIRM y S_{-300} se muestran muy homogéneos, no presentan grandes cambios entre horizontes, salvo una ligera variación en el horizonte 3C, y en general son altos. Sólo H_{cr} mostró una tendencia de aumentar en los horizontes A de cada ciclo y disminuir con respecto a éstos en los horizontes C, pero de igual manera esta variación es ligera. (Figura 5.3).

En cuanto a la parte inferior de este perfil, la cual contiene a los ciclos pedológicos 4 y 5 (4A, 4C, 5AE, 5ABtss, 5Bk, 5Ck) podemos ver que en general los valores de χ_{lf} son menores que los de la parte superior; el máximo se encuentra en la superficie del horizonte 4A con un descenso paulatino hacia el 4C, mientras que la susceptibilidad en el ciclo pedológico 5 tiene valores bajos con algunas variaciones entre horizontes que se vuelven poco notorias debido a los altos valores de los suelos de la parte superior. Esta misma tendencia se observa para ARM y SIRM, aunque en este caso presentan valores tan altos como los de la parte superior en los Horizontes

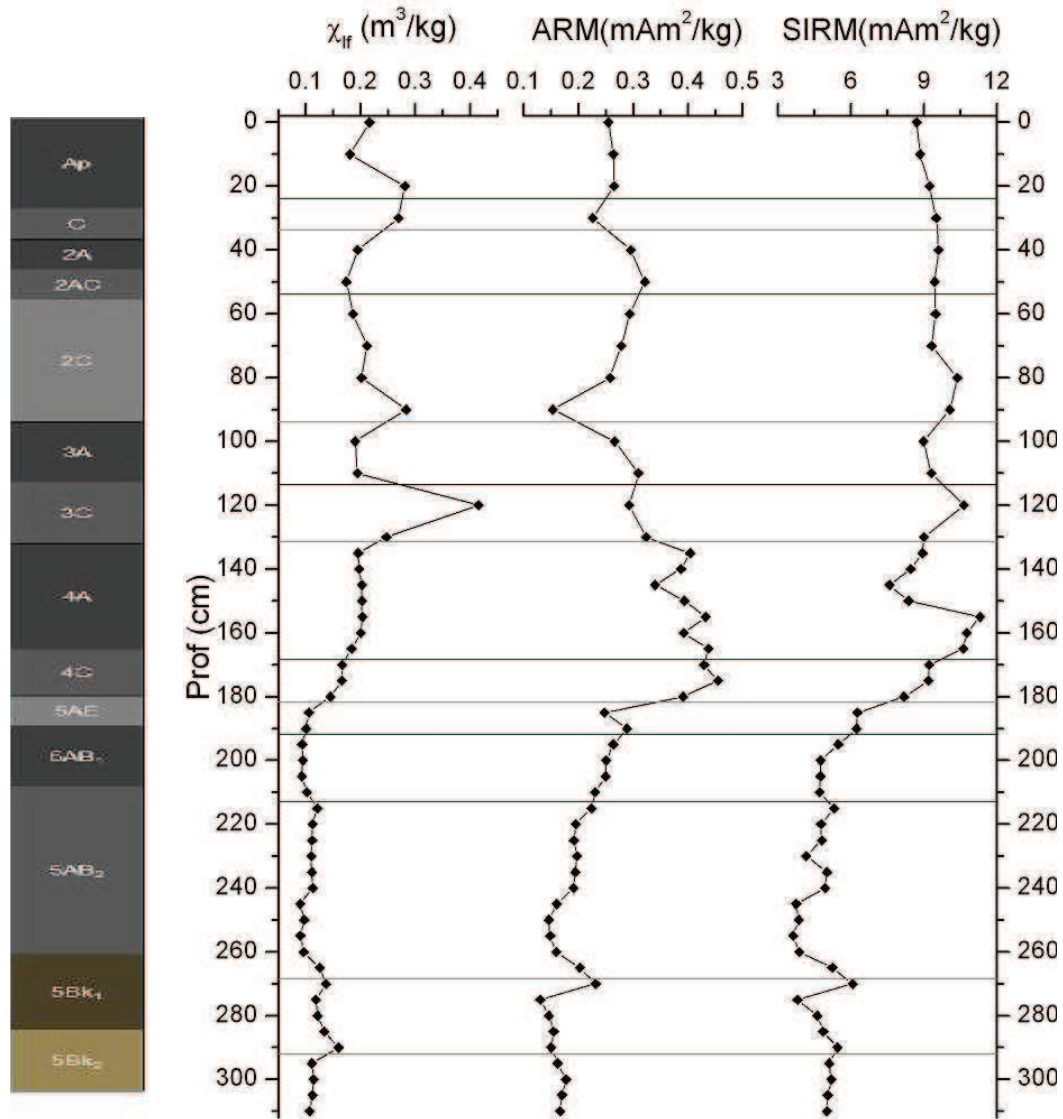


Figura 5.1: Propiedades Magnéticas indicadoras de concentración de partículas magnéticas en los diferentes horizontes del perfil San Pablo en Teotihuacan

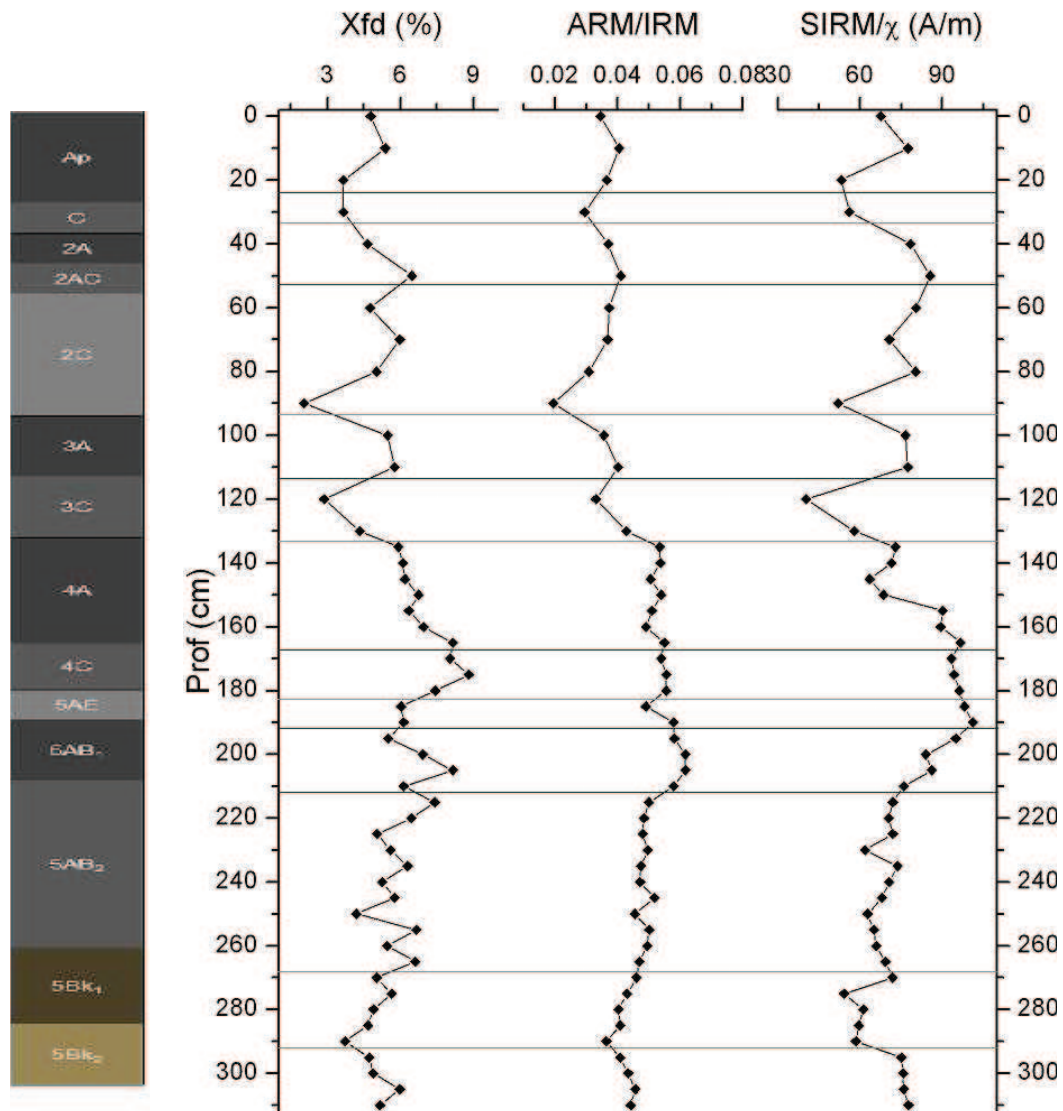


Figura 5.2: Propiedades Magnéticas indicadoras de tamaño de partículas magnéticas en los diferentes horizontes del perfil San Pablo en Teotihuacan

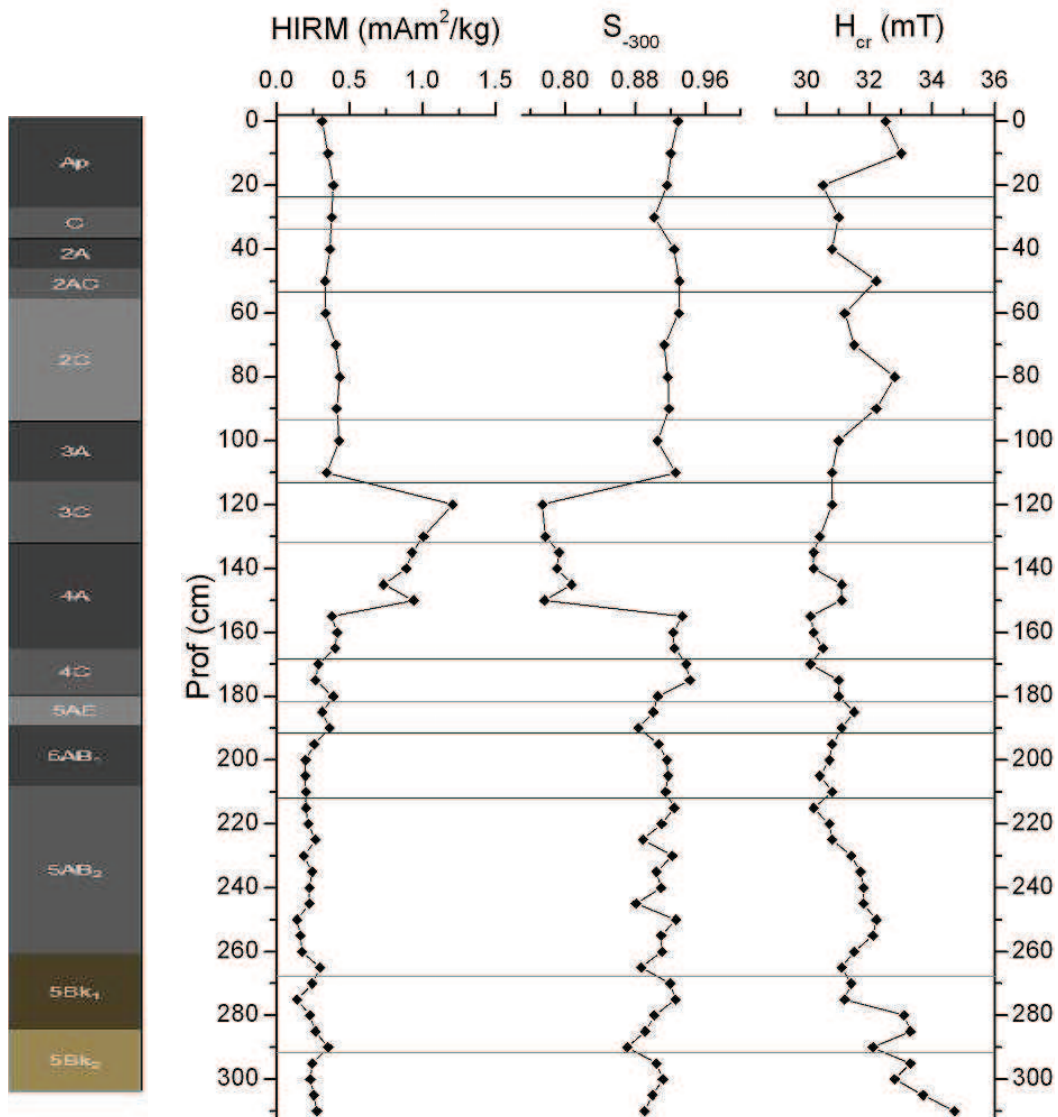


Figura 5.3: Propiedades Magnéticas indicadoras de coercitividad como indicio de la mineralogía magnética en los diferentes horizontes del perfil San Pablo en Teotihuacan.

5.1. COMPORTAMIENTO MAGNÉTICO DEL PNSP EN TEOTIHUACAN Y SU RELACIÓN CON LOS

4A y 4C. Los indicadores de tamaño de partícula muestran una disminución en el tamaño para esta zona, en particular en los horizontes 5AE y 5ABtss y también en menor medida para 4A. Los indicadores de coercitividad para esta zona son un poco erráticos, pero H_{cr} muestra un aumento en la concentración de minerales con alta coercitividad hacia la parte más profunda del perfil, en los horizontes 5Bk y 5Ck, aunque S_{-300} y HIRM no siguen esta misma tendencia (Figura 5.3).

5.0.2. Curvas κ vs T en muestras seleccionadas de San Pablo

Las curvas de κ vs T de los horizontes seleccionados de San Pablo presentan en su gran mayoría un comportamiento parecido. Salvo por el Horizonte 3C, los demás horizontes muestran un aumento en κ en un rango de temperatura de 200 a 400 °C, con un máximo al rededor de los 300 °C; posteriormente se observa una rápida pérdida de susceptibilidad entre los 450 y 500 °C. El comportamiento de estas curvas corresponde al de la serie de las Ti-magnetitas. Mientras que el horizonte 3C muestra dos fases magnéticas, una representada por una pérdida parcial de κ entre 100 y 200 °C, y otra por el decaimiento entre 500 y 550 °C. Esta última coincide con la Temperatura de Curie de la magnetita, mientras que la primera inflexión en la curva coincide con la Temperatura de Neel de la goethita.

5.1. Comportamiento magnético del PNSP en Teotihuacan y su relación con los procesos pedogenéticos

La parte superior del perfil San Pablo contiene tres Fluvisoles con horizontes Ap- C- 2A-2C-3A-3C. Los horizontes C, 2C y 3C presentan un gran contenido de partículas ferrimagnéticas, pero los indicadores de tamaño de partícula muestran que son de grano grueso. Sus respectivos horizontes orgánicos Ap, 2A, 3A muestran una disminución en la susceptibilidad, lo que indica que hay una disminución en el contenido de ferrimagnéticos. También se observa que esta disminución está acompañada de un aumento en el contenido de minerales magnéticos de grano fino y ultra-fino. Además se puede notar un ligero aumento en la coercitividad de estos horizontes en comparación con sus respectivos horizontes C.

Este comportamiento indica que los portadores magnéticos en los horizontes C son minerales provenientes del material parental, presentes en los sedimentos aluviales. Estos minerales son de naturaleza volcánica, dada la cercanía de las fuentes de este tipo (Cerro Gordo al norte del perfil San Pablo (Figura 3.5)). Estos resultados

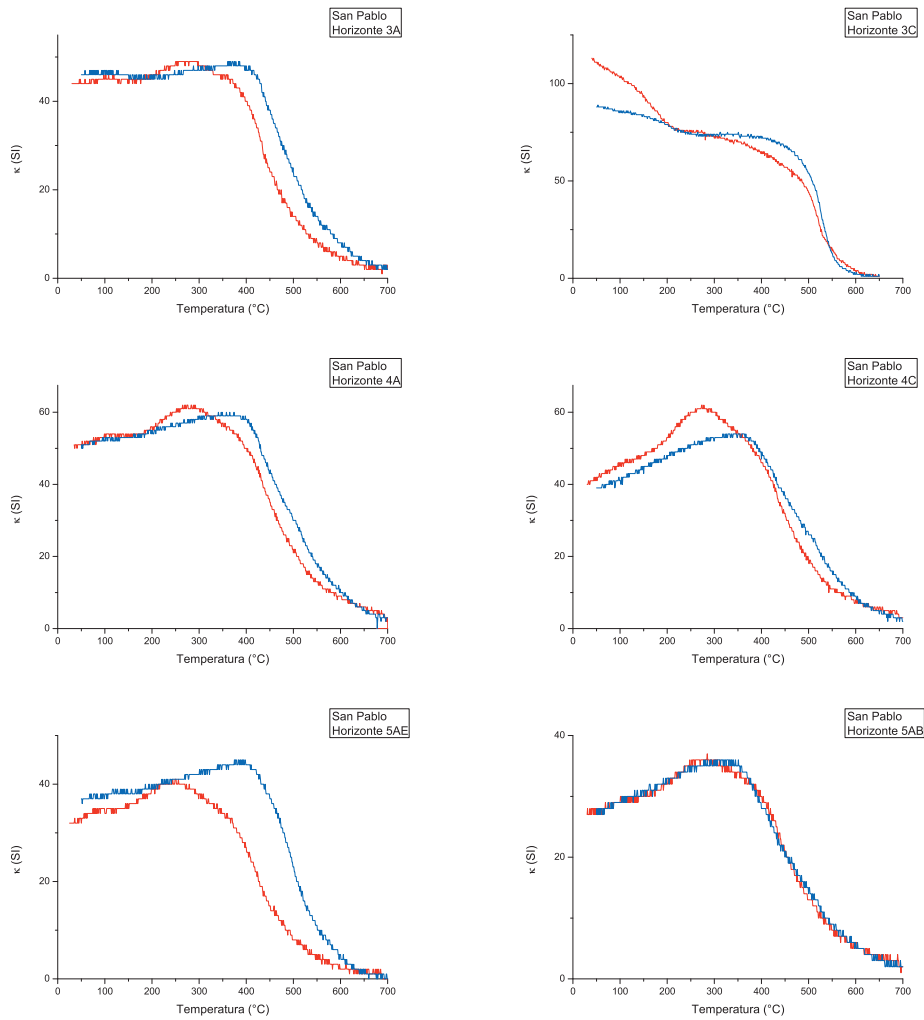


Figura 5.4: Curvas de Susceptibilidad Magnética κ vs Temperatura $T(^{\circ}\text{C})$ de algunos horizontes del perfil San pablo en Teotihuacan. 3A, 3C, 4A, 4C, 5AE, 5AB.

5.1. COMPORTAMIENTO MAGNÉTICO DEL PNSP EN TEOTIHUACAN Y SU RELACIÓN CON LOS

son congruentes con los hallazgos de Rivas *et al.* (2012), quien analiza los parámetros magnéticos en suelos superficiales del Valle de Teotihuacán. Asimismo, Cabadas (2004) encuentra que la mineralogía de los suelos de Teotihuacán posee un porcentaje alto de minerales ferromagnesianos de origen volcánico. Por su parte, la disminución de la susceptibilidad magnética en los horizontes A, se asocia a los procesos de pedogénesis, que en este caso se refieren principalmente a la incorporación de materia orgánica, la cual es diamagnética. En estos horizontes el intemperismo es incipiente y no se tienen óxidos de hierro. Este comportamiento se ha documentado claramente en los suelos de naturaleza volcánica no solo en México (Ortega *et al.*, 2003, Rivas *et al.*, 2006; 2012), sino en otras partes del mundo (Orgeira *et al.*, 1998; Vásquez *et al.*, 1998; Schellenberger *et al.*, 2003, entre otros).

En lo que concierne a la parte baja del perfil, los ciclos pedológicos 4 y 5, se observa una clara reducción en la concentración de materiales ferrimagnéticos. Ningún valor de χ_{lf} en estos horizontes alcanza los encontrados en la parte alta del perfil. No obstante, se destaca que la proporción de partículas magnéticas de tamaño fino y ultra-fino es mayor. En 4A, Rivera *et al.* (2007) y Sánchez *et al.* (2013) reportan material quemado en este horizonte, lo cual podría indicar que el aumento de partículas finas es debido a quema. Los parámetros que indican la coercitividad no muestran diferencias notorias, pero sí se logra distinguir una tendencia de aumento de minerales magnéticos más coercitivos (Figura 5.3), en el PNSP (horizontes 5AE, 5ABtss, 5Bk, 5Ck), en donde aumenta la presencia de minerales antiferromagnéticos, pero sin volverse esta fase dominante. La mineralogía magnética detectada de las curvas correspondientes (Fig. 5.4) señalan que la fase dominante es la de la serie de las Ti-magnetitas. Al desglosar los parámetros específicos por horizonte en el PNSP, se observa una ligera disminución en la susceptibilidad magnética relacionada con tamaños de dominio magnético finos (SD y SP) y con un ligero aumento en la presencia de minerales de alta coercitividad. Esto se debe a los procesos reductomórficos que dominan en este horizonte, en el que se ha reportado eluviación, formación de nódulos de Fe, presencia de diatomeas, y que se considera se producen por la irrigación durante las fases de ocupación teotihuacana (Sánchez *et al.*, 2013). En 5ABtss la susceptibilidad es mayor que en 5AE, dada la acumulación de partículas arcillosas. A pesar de esto, se nota que este valor es menor que en 5Bk, lo que resulta contradictorio, pues la presencia de carbonatos en este horizonte, debería producir una disminución de susceptibilidad. Sin embargo, Sánchez *et al.* (2013) señalan que en este horizonte se encuentran, además de los carbonatos, cutanes de arcilla, los cuales son ricos en Fe. Finalmente, el horizonte 5Ck registra una disminución en la susceptibilidad, y cambios claros en los otros parámetros magnéticos (Figuras 5.1, 5.2 y 5.3). Nuevamente Sánchez *et al.* (2013) postulan que los carbonatos contenidos en el horizonte tienen una edad de 17,000 años AP, lo que claramente marca una discontinuidad entre este horizonte y el PNSP, por lo que pertenece a otra fase de

formación de suelo.

5.2. Reconstrucción ambiental del perfil San Pablo, en Teotihuacan, con base en el magnetismo

Los patrones magnéticos detectados son los siguientes:

- a. En 5AE hay una ligera disminución en la señal, que se interpreta como resultado de los procesos reductomórficos por irrigación.
- b. 5ABtss registra un ligero aumento en susceptibilidad asociado a los procesos de iluviación de arcilla.
- c. 5Bk posee valores ligeramente más altos de susceptibilidad que se explican por las fases previas de iluviación de arcilla con Fe.
- d. Los parámetros magnéticos del horizonte 5Ck reflejan una discontinuidad que coincide con la edad encontrada para este horizonte, el cual fue formado en una fase muy anterior al desarrollo del PNSP.
- e. Valor relativamente alto de susceptibilidad en 4A con contribución de partículas finas y ultrafinas, así como de material quemado.
- f. Fuerte señal magnética en los horizontes C de los ciclos pedológicos superiores, formados por sedimentación aluvial volcániclaística.
- g. Señal más débil en los horizontes A, en donde hay acumulación de materia orgánica y menor intemperismo.
- h. Cambio notable en la señal en la parte inferior del perfil, en donde se encuentra el PNSP.

Lo primero que surge a la vista es que el factor pedogénico que ha influido más en la diferenciación de los ciclos pedológicos es el tiempo de formación. Los paleosuelos más jóvenes indican una mayor inestabilidad del paisaje, de tal manera que su desarrollo es incipiente. Es así que los parámetros magnéticos están relacionados con la mineralogía del material parental, de naturaleza volcánica, que les imprime una firma magnética intensa.

Por otro lado, en el PNSP, en el que hay un lapso mayor de estabilidad en el paisaje, la señal magnética está bien diferenciada, e inclusive permite observar cambios específicos en función del tipo de horizonte. La señal encontrada es modificada,

5.2. RECONSTRUCCIÓN AMBIENTAL DEL PERFIL SAN PABLO, EN TEOTIHUACAN, CON BASE

en los horizontes superficiales de este paleosuelo, como consecuencia de la actividad antrópica.

6 | Señal magnética debido a actividad humana

En los dos sitios estudiados se registra un fuerte impacto en los suelos debido a las actividades humanas. A pesar de que en ambas localidades, las condiciones climáticas y de ocupación son muy diferentes, se pueden hacer ciertas generalizaciones en cuanto al uso del suelo y formas de ocupación, las cuales repercuten en la señal magnética.

Las diferencias entre las ocupaciones humanas de ambos sitios son muy claras tanto en la escala como en el uso del suelo, ya que el caso de La Playa se trata de una sociedad organizada en aldeas agrícolas, con una población de alrededor de 500 habitantes en la que aún convivían prácticas de cazadores y recolectores con agricultura temprana, mientras que el caso de Teotihuacan se trata de uno de los desarrollos urbanos más grandes de la época prehispánica; por lo que se espera que las modificaciones al paisaje que conllevaron sus actividades también sean de una escala diferente.

En el caso de La Playa, vemos que los vestigios de actividad humana más prominentes son la construcción de hornos. En el polígono que ocupa la zona arqueológica se han encontrado más de 3,000 hornos (Villalpando *et al.*, 2009). Si bien esta área es mucho menor que la ocupación en Teotihuacan, la actividad llevada a cabo ha dejado una firma magnética más notoria, ya que, como se ha mencionado, la combustión del suelo con presencia de materia orgánica y cierto contenido de paramagnéticos de hierro y antiferromagnéticos, puede transformar a éstos en ferrimagnéticos, provocando en algunos casos un aumento en la susceptibilidad en factores de más de 10 veces el valor inicial (Tite and Mullins, 1971). Este tipo de transformaciones las vemos también en las curvas K vs T de las muestras de horizontes A de este trabajo (Figura 4.8 b y c), en las que se observa que la curva de susceptibilidad durante el enfriamiento muestra valores de ésta de hasta tres veces la inicial.

Dado el comportamiento magnético del perfil Hornos 2 en La Playa, queda de

manifiesto que el incremento en la señal magnética no es completamente atribuible a la pedogenésis, ya que ésta es incipiente, con una escasa acumulación de materia orgánica con un intemperismo débil; sino más bien a actividades antrópicas por la construcción y uso de los hornos, y a la modificación del paisaje por los entierros, que también son abundantes (Villalpando *et al.*, 2007). Los sedimentos limosos superficiales presentan el máximo valor de χ_{lf} pero no tienen valores altos de los indicadores de partículas finas o de gran cantidad de ferrimagnéticos; mientras que el horizonte 2A que le subyace también presenta un aumento en la susceptibilidad magnética con respecto a la parte baja del perfil, pero en este caso sí vemos un aumento en la cantidad de partículas finas y ultra-finas. En ambos casos, las curvas K vs T muestran que la mineralogía dominante es magnetita.

Las propiedades magnéticas que presenta el horizonte 2A muestran una mayor coincidencia con las características que reportan varios estudios sobre partículas magnéticas formadas mediante combustión en el suelo (Thompson and Oldfield, 1986; Maher, 1986, entre otros). Estos trabajos reportan la formación de magnetita de tamaños de partícula fina y ultra-fina. En consecuencia, se puede concluir que la formación de estas partículas magnéticas se da en los hornos de la zona arqueológica. Kletetschka y Banerjee (1995) mencionan una forma muy precisa de diferenciar las partículas pirogénicas de las pedogénicas, la cual consiste en encontrar la temperatura de transición de Verwey para la magnetita. En este trabajo los autores identificaron que la magnetita secundaria de un paleosuelo en una secuencia loess-paleosuelo tenía una temperatura de transición más alta, a 115 K; mientras que la magnetita primaria del loess la tenía a 100 K, pero después de someter el loess a procesos de combustión, la temperatura de Verwey también aumentaba. Entonces una transición de Verwey a 115 K es característica de las partículas de magnetita pirogénica.

Con respecto a la secuencia de San Pablo en Teotihuacan, en la descripción del horizonte 4A de Sánchez-Pérez *et al.* (2013) se menciona que en su parte superior contiene una capa con fragmentos de carbón, lo cual es evidencia de que este suelo fue sometido a un proceso de quema. Podemos ver que el horizonte 4A también presenta propiedades magnéticas características de partículas pirogénicas; es decir que vemos en la parte superior de este horizonte un aumento en la susceptibilidad, en el contenido de ferrimagnéticos, probablemente magnetita, y una gran cantidad, de partículas de grano fino y ultra-fino. Por lo que se puede decir que las evidencias apuntan a que las partículas magnéticas de este horizonte se formaron mediante la acción de fuego; es probable que esta quema se asocie a las prácticas agrícolas de quema. Aunado al fuego como evidencia de actividades agrícolas, se tiene la presencia del horizonte 5AE, el cual se piensa que es producto de la irrigación al suelo, de manera que por saturación de agua se desarrollan condiciones reductomórficas

(Sánchez-Pérez *et al.*, 2013), lo cual también se refleja en los patrones magnéticos.

También se ha registrado otro cambio en lo que se refiere a la sedimentación-pedogénesis, ya que en la parte superior del perfil hay un predominio de procesos de erosión/sedimentación. Este hecho también se observa claramente en las propiedades magnéticas, las cuales muestran un aumento de la susceptibilidad relacionada a la entrada de sedimentos aluviales de origen volcánico, ricos en ferrimagnéticos. Los tres ciclos de sedimentación se encuentran intercalados por una pedogénesis incipiente demarcada en las propiedades magnéticas por una disminución de la susceptibilidad magnética pero al mismo tiempo por un aumento en el contenido de partículas finas y ultra-finas. Estas transformaciones se encuentran relacionadas con el aporte de diamagnéticos de materia orgánica y a la irrigación de las actividades agrícolas. Existe una discusión sobre si el aumento en la sedimentación se da durante las etapas de ocupación por la degradación del suelo o durante las etapas de abandono por el desuso y falta de mantenimiento de las terrazas agrícolas (McClung *et al.*, 2005; Rivera *et al.*, 2007). De acuerdo a los fechamientos realizados en material carbonizado entre los Fluvisoles que sepultan al PNSP (1290-1410 DC: Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2011), esta fase de sedimentación se da en la época Posclásica y se continua en la Colonia.

7 | Conclusiones

Se han estudiado las propiedades magnéticas de las muestras de dos secuencias edafosedimentarias, y se han analizado las diferencias entre los ciclos pedológicos y los eventos de sedimentación, interpretándose desde el punto de vista de las condiciones (paleo)ambientales y de la perturbación antrópica.

Los resultados muestran que hay una fuerte correlación entre el tamaño de las partículas magnéticas con el grado del desarrollo de un suelo. Las partículas de tamaño fino y ultrafino se ubican en los horizontes con mayor grado de pedogénesis. Por el contrario, la concentración de ferrimagnéticos no es un buen indicador, ya algunos sedimentos presentan valores altos de susceptibilidad magnética de tamaño grueso, que evidencian una proporción alta de minerales litogénicos.

De esta manera, a pesar de la dificultad para establecer correlaciones claras entre ambiente y propiedades magnéticas, en este estudio es claro que estas últimas se desarrollan en función de la pedogénesis y, en consecuencia, pueden ser indicadoras de los ciclos de estabilidad ambiental.

Los suelos como el PSR y el PBSP de alto grado de desarrollo, a pesar de ser poligenéticos y policíclicos, evidencian fases de estabilidad ambiental que repercuten en la formación de una señal magnética clara, en la que destaca la influencia de partículas de tamaño fino y ultrafino. En estos suelos, se puede detectar, además que cada horizonte produce su propia señal magnética. A diferencia, las fases de mayor inestabilidad están marcadas por la sedimentación continua, de manera que las propiedades magnéticas son heredadas del material parental (el cual puede también contener fragmentos de suelo con presencia de minerales portadores de una fuerte señal magnética de grano fino).

También se puede concluir que en ambas secuencias, se tiene una firma magnética relacionada con las actividades humanas que se llevaron a cabo, sobre todo por quema del suelo. En el caso de La Playa, la combustión se debe a la construcción de hornos, en tanto que en Teotihuacan, las actividades de quema son producidas

por el uso agrícola. Este último también causa modificaciones en la señal, ya que la irrigación del suelo repercute en el desarrollo de procesos reductomórficos que originan la reducción y lixiviación del Fe.

A pesar de estar ubicadas en regiones con condiciones ambientales tan diferentes, tanto en La Playa como en Teotihuacan, es claro que las actividades humanas causan mayor inestabilidad del paisaje, evidenciado por fases de sedimentación-erosión y menor desarrollo del suelo. Las firmas en los diferentes parámetros magnéticos analizados reflejan muy bien estas fases, por lo que el uso de los indicadores magnéticos puede ser muy útil para establecer el grado de perturbación antrópica. Sin embargo, es importante anotar que este tipo de estudios requiere tener un conjunto de resultados de propiedades morfológicas, físicas y químicas para tener resultados más confiables.

Bibliografía

- Abbaszadeh Afshar, F., Ayoubi, S., and Jalalin, A. (2010). Soil redistribution rate and its relationship with soil organic carbon and total nitrogen using ^{137}Cs technique in a cultivated complex hillslope in western iran. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101:606–614.
- Aguilar-Reyes, B., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Morales-Contreras, J., Quintana-Owen, P., Carvallo, C., and 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*, 52:121–133.
- Babanin, V. F., Trukhin, V. I., Karpachevskiy, L. O., Ivanov, A. V., and Morosov, V. V. (1995). Soil magnetism. *Moscow-Yaroslavl: Yaroslavl State University Press*.
- Ballanger, J. and Mabry, J. (2011). Temporal frequency distributions of alluvium in the american southwest: taphonomic, paleohydraulic, and demographic implications. *Journal of Archaeological Science*, 38:1314–1325.
- Becker, H. and Fassbinder, J. (1999). Magnetometry of a scythian settlement in siberia near cicah in the baraba steppe. *In 3rd International Conference on Archaeological Prospection*, pages 168–172.
- Blake, W., Wallbrink, P., Doerr, S., Shakesby, R., and Humphreys, G. (2006). Magnetic enhancement in wildfire-affected soil and its potential for sediment-source ascription. *Earth Surf. Proc. Land*, 31:249–264.
- Booth, R., Jackson, S., Forman, S., Kutzbach, J., Bettis, E., and Kreig, J. (2005). A severe centennial-scale drought in midcontinental north america 4200 years ago and apparent global linkages. *The Holocene*, 15:321–328.
- Brennan, E. W. and Lindsay, W. L. (1998). Reduction and oxidation effect on the solubility and transformation of iron oxides. *Soil Science Society of America Journal*, 62:930–937.

- Brown, D. E. (1994). *Sonora Savanna Grassland. En Biotic Communities: Southwestern United States and Northwest Mexico*. University of Utah Press.
- Butler, R. F. (1992). *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geological Terranes*. Blackwell Scientific Publications.
- Cabrera, R. (2005). Nuevas evidencias arqueológicas del manejo del agua en teotihuacan. el campo y la ciudad. In Ruiz-Gallut, M. and Torres-Peralta, J., editors, *Arquitectura y urbanismo: pasado y presente de los espacios en Teotihuacan, Memoria de la Tercera Mesa Redonda, Instituto Nacional de Antropología e Historia*, pages 121–162.
- Caitcheon, G. (1993). Applying environmental magnetism to sediment. tracer in hydrology. *Proceeding of the Yokohama Symposium*, 215:285–292.
- Carpenter, J. and Sánchez, G. (2013). Los cambios ambientales del holoceno medio/holoceno tardío en el desierto de sonora y sus implicaciones en la diversificación del yutoazteca y la difusión del maíz. *Diálogo Andino*, 41:199–210.
- Cruz, T., Sedov, S., Sánchez, G., Pi-Puig, T., Pustovoytov, K., Barceinas, H., Ortega-Guerrero, B., and Solleiro-Rebolledo, E. (2014). Late pleistocene-holocene palaeosols in the north of sonora, mexico: chronostratigraphy, pedogenesis and implications for environmental history. *European Journal of Soil Science*, 65:455–469.
- Cruz y Cruz, T. (2011). Paleoaambientes del cuaternario tardío a partir del registro paleopedológico. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dearing, J., Morton, R., Price, T., and Foster, I. . (1986). Tracing movements of topsoil by magnetic measurements: two case studies. *Phys. Earth Planet Inter.*, 42:93–104.
- Dearing, J. A., K. L. Hay, S. M. J. B., Huddleston, A. S., Wellington, E. L. H., and Loveland, P. J. (1996). Magnetic susceptibility of soil: An evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophysical Journal International*, 127:728–738.
- Evans, M. E. and Heller, F. (2003). *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics*. Academic Press.
- Fassbinder, J. W. E., Stanjek, H., and Vali, H. (1990). Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature*, 343:161–163.

- Fialová, H., Maier, G., Petrovsky, E., Kapicka, A., Boyko, T., and Scholger, R. (2006). Magnetic properties of soils with different geological and environmental settings. *Journal of Applied Geophysics*, 59.
- Flanders, P. J. (1994). Collection, measurement and analysis of airborne magnetic particulates from pollution in the environment. *Journal of Applied Physics*, 75:5931–5936.
- Grimley, D., Arruda, N., and Bramstedt, M. (2004). Using magnetic susceptibility to facilitate, rapid, reproductive and precise delineation of hydric soils in midwestern usa. *Catena*, 58:183–213.
- Grimley, D. and Vepraskas, M. (2000). Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:2174–2180.
- H., C. B. (2004). Paleosuelos como indicadores de cambio ambiental en el cuaternario superior: El caso del valle de teotihuacán. Master's thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández, J. (2007). Geología y geomorfología de la región de los yacimientos de obsidiana de otumba en el sector norte de la sierra nevada de México. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Huang, C., Pang, J., Huang, P., Hou, C., and Han, Y. (2002). High-resolution of the oldest cultivated soils in the southern loess plateau in china. *Catena*, 47.
- Hulett, L. D., Weinberger, A. J., Northcutt, K. J., and Ferguson, M. (1980). Chemical species in fly ash from coal-burning power plants. *Science*, 210:1356–1358.
- Hunt, C. and Premathilake, R. (2012). Early holocene vegetation, human activity and climate from sarawak, malaysian borneo. *Quaternary International*, 249:105–119.
- Hunt, P. C., Banerjee, S. K., Han, J., Solheid, P. A., Oches, E. A., Sun, W., and Liu, T. S. (1995). Rock-magnetic proxies of climate change in the loess-palaeosol sequences of the western loess plateau of china. *Geophysical Journal International*, 123:232–246.
- Ising, G. (1943). On the magnetic properties of varved clay. *Ark. Mat. Astron. Fys.*, 29(5):1–37.
- Jordanova, D., Jordanova, N., and Werban, U. (2013). Environmental significance of magnetic properties of gley soils near rosseau (germany). *Environmental Earth Sciences*, 69(5):1719–1732.

- Kleber, M., Rößner, J., Chenu, C., Glaser, B., Knicker, H., and Jahn, R. (2003). Prehistoric alteration of soil properties in a central german chernozemic soil: In search of pedologic indicators for prehistoric activity. *Soil Sciences*, 168:292–306.
- Kletetschka, G. and Banerjee, S. K. (1995). Magnetic stratigraphy of chinese loess as a record of natural fires. *Geophysical Research Letters*, 22:1341–1343.
- Landgraf, C. and Royall, D. (2006). Spatial patterns of surface soil magnetism and soil redistribution across a fallow field, northern alabama. *Southeast Geographer*, 46(1):1–22.
- Le Borgne, E. (1950). Mesures magnétiques en bretagne centrale. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences (Paris) Série B*, 231:584–586.
- Le Borgne, E. (1951). Mesures magnétiques en bretagne centrale. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences (Paris) Série B*, 233:82–84.
- Le Borgne, E. (1960). Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. *Annales de Géophysique*, 16:159–195.
- Linford, N. (2002). Magnetic ghosts: Mineral magnetic measurements on roman and anglo-saxon graves. *Geophysical Research Abstracts*, 4.
- Liu, X., Rolph, T., Bloemendal, J., Shaw, J., and Liu, T. (1995). Quantitative estimates of palaeoprecipitation at xifeng, in the loess plateau of china. *Palaeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 113:243–248.
- Lovley, D., Stolz, J., Nord, G., and Phillips, E. (1987). Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism. *Nature*, 330:252–254.
- Maher, B. (1998). Magnetic properties of modern soils and quaternary loessic paleosols: Paleoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 137:25–54.
- Maher, B., Alekseev, A., and Alekseeva, T. (2003). Magnetic mineralogy of soils across the russian steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 201:321–341.
- Maher, B., Alekseeva, A., and 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.
- Maher, B., Thompson, R., and Zhou, L. (1995). Spatial and temporal reconstructions of changes in the asian palaeomonsoon: a new mineral magnetic approach. *Earth Planetary Science Letters*, 125:461–471.

- Maher, B. A. (1986). Characterisation of soils by mineral magnetic measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 42:76–92.
- Maher, B. A. and Taylor, R. M. (1988). Formation of ultrafine-grained magnetite in soils. *Nature*, 336:368–370.
- Maher, B. A. and Thompson, R. (1999). *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge University Press.
- Marshall, A. (1998). Visualising burnt areas; patterns of magnetic susceptibility at gifting power 1 round barrow(glos., uk). *Archaeological Prospection*, 5:159–177.
- McClung Heumann, E. S., Domínguez Rubio, I., Gama, J., Solleiro, E., and Sedov, S. (2005). Radiocarbon dates from soil profiles in the teotihuacan valley, mexico: indicators of geomorphological processes. *Radiocarbon*, 47(1):159–175.
- McLaurin, B., Kula, J., and Hirsch, A. (2007). Resumen de las actividades arqueológicas en la playa. *Sonora, México*.
- Mokhtari-Karchegani, P., Ayoubi, S., Gao-Lu, S., and Honarju, N. (2011). Use of magnetic measures to assess soil redistribution following deforestation in hilly region. *Journal of Applied Geophysics*, 75:227–236.
- Orgeira, M., Vázquez, C., Compagnucci, R., Raposo, I., and Pereyra, F. (2009). Magnetismo de rocas en suelos actuales de la pampa ondulada provincia de buenos aires, argentina. vinculación del clima en el comportamiento magnético. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(I):65–78.
- Orgeira, M., Walther, A., Vázquez, C., Alonso, S., Di Tommaso, I., Sherwood, G., Yuguan, H., and Vilas, J. (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(6):561–570.
- Ortega, B., Sedov, S., Solleiro, E., and Soler, A. (2004). Magnetic mineralogy in barranca tlalpan exposure paleosols, tlaxcala, mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(1):120–132.
- Parker, A., Lucas, A., Walden, J., Goudie, A., Robinson, M., and Allen, T. (101). Late holocene geoarchaeological investigation of the middle thames floodplain at dorney, buckinghamshire, uk: An evaluation of the bronze age, iron age, roman and saxon landscapes. *Geomorphology*.
- Ratray, E. (1981). La industria de la obsidiana durante el período coyotlatelco. *Revista Mexicana de Estudios Antropológicos*, 27:213–223.

- Rivas, J., Ortega, B., Sedov, S., Solleiro, E., and Sánchez, S. (2012). Mineralogía magnética de suelos volcánicos en una toposecuencia del valle de teotihuacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(1):1–20.
- Rivas, J., Ortega, B., Sedov, S., Solleiro, E., and Sychera, S. (2006). Rock magnetism and pedogenetic processes in luvisol profiles: Examples from central russia and central mexico. *Quaternary International*, 156:212–223.
- Rivera-Uria, M., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Pérez-Pérez, J., McClung de Tapia, E., González, A., and Gama-Castro, J. (2007). Degradación ambiental en el valle teotihuacan: evidencias geológicas y paleopedológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59:203–217.
- Roman, S., Johnson, W., and Geiss, C. (2013). Grass fires-an unlikely process to explain the magnetic properties of prairie soils. *Geophysical Journal International*, 195:1566–1575.
- Royall, D. (2001). Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. *Catena*, 46:15–34.
- Sanders, W., Parsons, J., and Santley, R. (1979). *The Basin of Mexico: Ecological processes in the evolution of a civilization*. Academic Press.
- Schellenbergera, A., Hellerb, F., and Veita, H. (2003). Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the las carreras loess-paleosol sequence in valle de tafli, tucuman, nw-argentina ! *Quaternary International*, 106:159–167.
- Schwertmann, U. and Heinemann, B. (1959). Uber das vorkommen und die entstehung von maghemit in nordwestdeutschen b/sden. *Neues Jahrbuch far Mineralogie Monatshefte*, 8:174–181.
- Schwertmann, U. and Latham, M. (1986). Properties of iron oxides in some new caledonian oxisols. *Geoderma*, 39:105–123.
- Schwertmann, U., Stucki, J., and Goodman, B. (1988a). Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvirments. in: Iron in soils and clay minerals. *Dordrecht: Reidel Publishing*, pages 267–308.
- Schwertmann, U., Stucki, J. W., and Goodman, B. (1988b). Some properties of soil and synthetic iron oxides. in "iron in soils and clay minerals. *Dordrecht: Reidel Publishing*, pages 203–250.

- Shankar, R., Prabhu, C., Warriar, A., Vijaya Kumar, G., and Sekar, B. (2006). A multidecadal rock magnetic record of monsoonal variations during the past 3700 years from a tropical indian tank. *Journal of the Geological Society of India*, 68:447–459.
- Simms, J. and Lobred, A. R. (2011). Application of magnetic susceptibility for wetlands delineation. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 16:105–114.
- Singer, M., Verousb, K., Fine, P., and Tenpas, J. (1996). A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils. *Quaternary International*, 34-36:243–248.
- Sánchez, G. (2010). *Los Primeros Mexicanos: Late Pleistocene/Early Holocene Archaeology of Sonora, Mexico*. PhD thesis, Department of Geoscience, University of Arizona.
- Sánchez Pérez, S., Solleiro Rebolledo, E., Sedov, S., McClung, E., Golyeva, A., Prado, B., and Ibarra Morales, E. (2013). The black san pablo paleosol of the teotihuacan valley, mexico: Pedogenesis, fertility, and use in ancient agricultural and urban systems. *Geoarchaeology: An International Journal*, 28(3):249–267.
- Solleiro Rebolledo, E., Sedov, S., McClung, E., Cabadas, H., Gama Castro, J., and Vallejo Gómez, E. (2006). Spatial variability of environment change in the teotihuacan valley during late quaternary: Paleopedological inferences. *Quaternary Internacional*, 156-157:13–31.
- Solleiro-Rebolledo, E., Sycheva, S., Sedov, S., Clung de Tapia, E., Y., R.-U., Salcido-Berkovich, C., and Kuznetsova, A. (2011). Fluvial processes and paleopedogenesis in the teotihuacan valley, méxico: Responses to late quaternary environmental changes. *Quaternary International*, 233:40–52.
- Solís-Castillo, B., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Liendo, R., Ortiz-Pérez, M., and López-Rivera, S. (2013). Paleoenvironment and human occupation in the maya lowlands of the usumacinta river, southern mexico. *Geoarchaeology: An International Journal*, 28:268–288.
- Stanjek, H., Fassbinder, J. W. E., Vali, H., Wigele, H., and Graf, W. (1994). Evidence of biogenic greigite (ferrimagnetic Fe₃S₄) in soil. *European Journal of Soil Science*, 45:97–103.
- Strzyszcz, Z., Magiera, T., and Heller, F. (1996). The influence of industrial emissions on the magnetic susceptibility of soils in upper silesia. *Studia Geophysica et Geodetica*, 40:276–286.

- Tauxe, L. (2010). *Essentials of Paleomagnetism*. Berkeley: University of California Press.
- Terhorst, B., Appel, E., and Werner, A. (2001). Palaeopedology and magnetic susceptibility of a loess-palaeosol sequence in southwest germany. *Quaternary International*, 76:231–240.
- Thompson, R. and Oldfield, F. (1986). *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin, London.
- Thompson, R., Stober, J., Turner, G., Oldfield, F., Bloemendal, J., Dearing, J., and Rummary, T. (1980). Environmental applications of magnetic measurements. *Science*, 207(4430):481–486.
- Thompson, R., Whitlock, C., Bartlein, P., Harrison, S., and Spaulding, W. (1993). *Climatic changes in the western United States since 18,000 yr B. P. En: Global Climates Since the Last Glacial Maximum*. University of Minnesota Press.
- Tite, M. S. and Mullins, C. E. (1971). Enhancement of the magnetic susceptibility of soils on archaeological sites. *Archaeometry*, 13:209–219.
- Van Devender, T. R. (1990). *Late Quaternary vegetation and climate of the Sonoran desert, United States and Mexico. En: Packrat Middens - the Last 40,000 Years of Biotic Change*. University of Arizona Press.
- Verosub, K., Fine, P., Singer, M., and TenPas, J. (1993). Pedogenesis and paleoclimate: interpretation of the magnetic susceptibility record of chinese loess-paleosol sequences. *Geology*, 21:1011–1014.
- Villalpando, E. and Carpenter, J. (2004). Proyecto arqueológico la playa, vi informe, temporada 2003. Technical report, INAH.
- Villalpando, M. (1999). Investigación arqueológica e identidad regional en el noroeste de sonora. *Noroeste de México, Número Especial: Antropología de la Identidad e Historia en el Norte de México*, pages 129–135.
- Villalpando, M. (2007). *La producción alfarera en el México antiguo IV*, chapter La cerámica de Sonora, pages 251–272. Colección Científica INAH.
- Villalpando, M. (2009). Cerro de trincheras. muros de piedra que acogen la espiral del mar. *Arqueología Mexicana*, 97:54–57.
- Vázquez, E. and Jaimes, R. (1989). Geología de la cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2):133–190.