

00369 3
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MORFOGENESIS DE SUELOS CON HORIZONTES
ENDURECIDOS EN UN AREA DEL ALTIPLANO DE
NARIÑO, COLOMBIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

EDAFOLOGIA
P R E S E N T A

LUCY NATIVIDAD MORA PALOMINO

DIRECTOR DE TESIS: DR. DAVID FLORES ROMAN

MEXICO, D. F.

1998

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

266027



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi Familia Colombiana:

Naty, mi madre

Laura, Julio, Manuel, Felipe y Marco

A mi Familia Mexicana:

Alvaro, Cielo, Laura y Sebastián

*A aquellos que en cada instante de nuestro compartir
me brindaron más que compañía.*

Mis amigos.

*Jesús Darío González, Alma S. Velázquez, Ana Julia
Bolaños, Rocio Crespo, Marta Cecilia Barbosa,
Maartie Hinter, Oscar E. Suárez, Sandra Morales y
Javier Bombela.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ciencias por brindarme un espacio para mi formación académica.

Al Instituto de Geología, UNAM, Departamento de Edafología, Sección Fertilidad de Suelos por permitir realizar mi tesis.

Al Dr. David Flores Román, por su acompañamiento y dirección en el desarrollo de la tesis.

Al Dr. Dimas Malagón Castro, por sus oportunos mensajes y recomendaciones en el desarrollo del trabajo.

Al Profesor Emérito Nicolás Aguilera Herrera†, por emprenderme en el camino de los suelos volcánicos y su inquietud por mi formación científica.

Al Dr. Jorge Enrique Gama Castro, por asumir la continuidad en la orientación de la tesis.

A los miembros de H. Jurado.

Dra. Norma Eugenia García Calderón

Dr. David Flores Román

Dr. Jorge Enrique Gama Castro

Dr. Dimas Malagón Castro

Dr. Víctor Manuel Malpica Cruz

M. en C. Otilio Arturo Acevedo Saldoval

M. en C. Miguel Ortiz Olguín

Por sus críticas y observaciones a la tesis

Al Dr. Jaime Dante Moran Zenteno e Ing. Rodolfo del Arenal Capetillo, que me brindaron la confianza y seguridad para sentarme parte del Instituto de Geología

A los compañeros del laboratorio de fertilidad, M. C. Otilio Arturo Acevedo Sandoval, M. C. Gilberto Vela, Claudia Hernández Palacio y Silvia Marta Herrera y los amigos de la Cofradía de los Oxisoles.

A los maestros, técnicos y personal administrativo que apoyaron, orientaron y brindaron facilidades en la realización de este trabajo; M. en C. Lourdes Flores, M. en C. Ernestina Vallejo Gómez, M. en C. Margarita Reyes Salas, Ing. Anastasio Lozano Cobo, Ing. Héctor Alfredo Legorrela Cuevas, M. en C. Víctor Dávila Alcocer, M. en C. María Angélica Arias, Jorge René Alcalá Martínez, Biol. Humberto Nuñez Cardona y Fernando Vega López.

A todo el personal académico del Dpto de Edafología del Instituto de Geología, que de una u otra forma apoyaron en la realización de este estudio.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	Página.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEORICO	5
1. Horizontes Endurecidos.....	5
A. Antecedentes.....	5
B. Clasificación.....	8
C. Caracterización.....	9
a. Características Físicas.....	9
b. Características Químicas.....	10
c. Estabilidad de los Cementantes.....	11
d. Mineralogía.....	11
D. Génesis.....	15
E. Procesos de Formación.....	17
a. Silicificación.....	21
F. Suelos asociados.....	23
G. Distribución.....	27
H. Importancia.....	29
	30
IV. OBJETIVOS.....	33
V. HIPOTESIS	33
VI. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO.....	34
1. Medio Físico.....	34
A. Situación Geográfica.....	34
B. Geología.....	34
a. Composición de las cenizas volcánicas para la zona de Estudio.....	38
C. Geomorfología.....	39
D. Clima.....	40
E. Vegetación.....	42
VII. METODOLOGIA.....	46
A. Fase de gabinete.....	46
a. Recopilación de información bibliográfica.....	46
b. Selección del sitio de muestreo.....	46
B. Fase de Campo.....	47
a. Reconocimiento de la zona.....	47
b. Descripción de los perfiles.....	47
c. Muestreo.....	47

TABLA DE CONTENIDO

Continuación...

	Página.
C. Fase de laboratorio.....	47
a. Físicas.....	47
b. Químicas.....	48
c. Estabilidad de los Horizontes endurecidos.....	49
d. Micromorfológicas.....	49
e. Mineralógicas.....	49
f. Morfológicas.....	50
f. Clasificación taxonómica de los perfiles.....	50
g. Análisis de resultados.....	50
VIII. RESULTADOS Y DISCUSION.....	51
1. Caracterización ecológica de la zona de muestreo.....	51
2. Caracterización de los perfiles estudiados.....	54
A. Perfil M1.....	54
B. Perfil M1A.....	65
C. Perfil M2.....	75
D. Perfil M3.....	86
E. Perfil M4.....	94
F. Perfil M4A.....	100
3. Propiedades mecánica y química del material endurecido en los perfiles.....	110
A. Resistencia a compresión simple.....	110
B. Prueba de estabilidad de los cementantes.....	111
C. Microanálisis químico del material cementante.....	112
4. Desarrollo de los perfiles.....	108
5. Clasificación de los perfiles.....	121
6. Génesis de los suelos y horizontes endurecidos.....	122
A. Evolución de los suelos.....	122
B. Génesis de las capas endurecidas.....	124
C. Uso y manejo.....	127
IX. CONCLUSIONES.....	130
X. BIBLIOGRAFIA.....	132
Anexo.....	140

Lista de tablas

TABLA		Página.
Tabla 1.	Estratigrafía del Departamento de niño.....	35
Tabla 2.	Análisis del Clima	44
Tabla 3.	Elementos ambientales del área de estudio	53
Tabla 4a.	Caracterización morfológica del Perfil M1	63
Tabla 4b.	Caracterización física del Perfil M1	63
Tabla 4c.	Caracterización Química del Perfil M1	63
Tabla 5.	Composición química elemental y mineralógica del Perfil M1	64
Tabla 6a.	Caracterización morfológica del Perfil M1A	73
Tabla 6b.	Caracterización física del Perfil M1A.....	73
Tabla 6c.	Caracterización Química del Perfil M1A.....	73
Tabla 7.	Composición química elemental y mineralógica del Perfil M1A	74
Tabla 8a.	Caracterización morfológica del Perfil M2	84
Tabla 8b.	Caracterización física del Perfil M2	84
Tabla 8c.	Caracterización Química del Perfil M2	84
Tabla 9.	Composición química y elemental mineralógica del Perfil M2	85
Tabla 10a.	Caracterización morfológica del Perfil M3	92
Tabla 10b.	Caracterización física del Perfil M3	92
Tabla 10c.	Caracterización Química del Perfil M3	92
Tabla 11.	Composición química elemental y mineralógica del Perfil M3	93
Tabla 12a.	Caracterización morfológica del Perfil M4	98
Tabla 12b.	Caracterización física del Perfil M4	98
Tabla 12c.	Caracterización Química del Perfil M4	98
Tabla 13.	Composición química elemental y mineralógica del Perfil M4	99
Tabla 14a.	Caracterización morfológica del Perfil M4A	106
Tabla 14b.	Caracterización física del Perfil M4A	106
Tabla 14c.	Caracterización Química del Perfil M4A	106
Tabla 15a.	Composición química elemental del Perfil M4A.....	107
Tabla 15b.	Oxidos libres y mineralogía del Perfil M4A.....	108
Tabla 16.	Resistencia a compresión simple	110
Tabla 17.	Prueba de estabilidad de los cementantes	112
Tabla 18.	Composición química del material cementante en los perfiles.....	113
Tabla 19.	Clasificación del Índice de desarrollo del perfil.....	118
Tabla 20.	Índice de Desarrollo del Perfil y de los Horizontes (IDP e IDH).....	119

Lista de figuras

FIGURA	Página.
Figura 1. Secuencia de alteración edáficas: Pedogénesis.....	13
Figura 2. Secuencia de alteración de cenizas.....	15
Figura 3. Ubicación de las Zonas con Suelos Endurecidos en Colombia.....	31
Figura 4. Localización del Departamento de Nariño y el área de estudio.....	36
Figura 5. Localización de los perfiles estudiados.....	37
Figura 6. Análisis del clima en la zona	45
Figura 7. Fotografía aérea de la zona de estudio.....	52
Figura 8. Esquema del Perfil M1	54
Figura 9a. Fotografía de lámina delgada del perfil M1, Luz plana.....	60
Figura 9b. Fotografía de lámina delgada del perfil M1, Nícoles cruzados.....	60
Figura 10. Esquema del Perfil M1A	65
Figura 10a. Fotografía de lámina delgada del perfil M1A, luz plana.....	72
Figura 10b. Fotografía de lámina delgada del perfil M1A, Nícoles cruzados.....	72
Figura 11. Esquema del Perfil M2	75
Figura 12a. Fotografía de lámina delgada del perfil M2, luz plana.....	83
Figura 12b. Fotografía de lámina delgada del perfil M2, Nícoles cruzados.....	83
Figura 13. Fotografía del Perfil M3	86
Figura 14a. Fotografía de lámina delgada del perfil M3, Luz plana.....	76
Figura 14b. Fotografía de lámina delgada del perfil M3, Nícoles cruzados.....	76
Figura 15. Esquema del Perfil M4	94
Figura 16. Esquema del Perfil M4A	87
Figura 17a. Fotografía de lámina delgada del perfil M4A, luz plana.....	95
Figura 17b. Fotografía de lámina delgada del perfil M4A, Nícoles cruzados.....	95
Figura 18. Gráfico de la resistencia a compresión simple de los horizontes endurecidos..	111
Figura 19. Fotomicrografía del Perfil M1	114
Figura 20. Fotomicrografía del Perfil M1A	115
Figura 21. Fotomicrografía del Perfil M3	115
Figura 22. Fotomicrografía del Perfil M2	116
Figura 23. Fotomicrografía del Perfil M4A	117
Figura 24. Esquema de la secuencia de depósitos de ceniza.....	120
Figura 25. Esquema del Modelo de evolución de los suelos estudiados.....	126

RESUMEN

La formación de suelos con capas endurecidas de origen volcánico en el mundo, está asociada a factores de formación como: tipo y naturaleza de los depósitos, mecanismos de sedimentación, condiciones de alteración y transformación del material parental. Para entender la presencia de estas capas es necesario correlacionar estos factores, a partir de análisis y observaciones a diferentes escalas.

El objetivo de esta investigación fue caracterizar los suelos y exponer con relación a las condiciones de formación una hipótesis sobre la presencia de sus capas endurecidas, así como también identificar los agentes cementantes.

A escala macro, con apoyo de fotos aéreas y estudios de suelo, se llevó a cabo la identificación de áreas con exposición de materiales endurecidos, ubicadas al norte del altiplano de Nariño, sur de Colombia, sobre la gran cadena Montañosa de los Andes Suramericanos. En campo el estudio se realizó, mediante la descripción de parámetros físicos y morfológicos, metodológicamente establecidos, de seis perfiles en cuatro zonas aledañas al aeropuerto de Nariño, municipio de Chachagüi.

Los suelos son caracterizados por la presencia de un horizonte superficial somero A, ubicado sobre tobas consolidadas de origen ígneo, de naturaleza dacítica y andesítica. Las expresiones morfo-genéticas de éstos, están asociadas a procesos de transformación pedoquímica de las cenizas. Mientras que, la presencia de la capa endurecida está ligada a mecanismos de consolidación, mediante procesos diagenéticos rápidos, a los cuales se suma, la acción cementante de los productos de alteración edafoquímica del material original, entre ellos arcillas, sílice amorfa y óxidos de hierro.

La reconstrucción de algunos elementos genéticos de las capas endurecidas, está apoyada sobre los análisis selectivos realizados a escala micro, como son: observaciones micromorfológicas, análisis de microscopía de barrido (MEB) y óxidos totales. Estos, junto con los resultados de las pruebas químicas y mecánicas, establecen semejanzas en el comportamiento y características con los horizontes tipo duripán. Y algunos tepetates de México cementados por sílice.

Morfológicamente, los suelos muestran características asociadas al orden Entisol, ya que han sido expuestos a procesos de evolución regresiva, sin embargo, las evidencias de alteración pedoquímica del material, permiten ubicarlos sobre intergrados Entisol -Inceptisol.



I. INTRODUCCION

Se conservará, solo lo que se ame

Se amará, sólo lo que seamos capaces de comprender

Y se comprenderá, sólo lo que se nos enseñó

"Baba Di aur"

La presente investigación considera la morfogénesis de seis perfiles de suelo, ubicados en los alrededores del aeropuerto de Chachagüi, al norte del altiplano de Nariño, Colombia, zona que pertenece a la gran cadena montañosa de los Andes Suramericanos. Sobre ésta se ha identificado una formación endurecida, de tobas, constituidas a partir de la consolidación de los materiales, por los cambios climáticos globales del continente, hipótesis planteada por Faivre y Gaviria (1992). El origen de esta formación está ligado al vulcanismo del Cuaternario, con aportes de materiales provenientes de diferentes focos volcánicos de áreas aledañas, de edad aproximada a los 10.000 años.

Estas formaciones endurecidas se han identificado en otras regiones de Colombia, las cuales ocupan entre 3 y 4 .5% de la zona Andina del país, también se han distinguido en otros países del Andén Pacífico en América y en países de otros continentes en donde se presenta actividad volcánica. Estas son conocidas como: Tepetates en México, Talpetate en Nicaragua, Cancahua en Ecuador entre otros, particularmente, como formaciones pedológicas, la clasificación Americana de Suelos (Soil Taxonomy, 1995), denomina estos horizontes como duripanes, fragipanes, petrocálcicos, petroféricos y petrogypicos, que se diferencian de acuerdo a la composición química del agente cementante.

Para el presente estudio se utilizan las palabras, capas endurecidas, ya que entre los objetivos del mismo, está el caracterizar el material endurecido e identificar los procesos que han propiciado su formación, sin embargo, en Colombia, de manera general a estos horizontes o capas se les ha denominado hardpan o duripán.

La importancia del estudio de la morfogénesis de estos horizontes o capas, radica principalmente, en que éstos representan una limitante física en los suelos para la infiltración del agua y en esta medida disminuyen los procesos de alteración físico-química y el desarrollo radical de las plantas, también provoca el lavado lateral de sales y por último aumenta la susceptibilidad a la erosión. De ahí que la exposición de estos horizontes se produzca por procesos erosivos naturales, que muchos casos es acentuado por las actividades antropogénicas.

La zona de estudio se caracteriza por tener un clima con un período de tres meses secos y dos estaciones de lluvia, las cuales son aprovechadas por los pobladores para la producción de alimentos de temporal y levante de ganado, actividades que han propiciado también la erosión de los suelos. Así, el deterioro del paisaje, se ha traducido socioeconómicamente en el cambio de uso del suelo y la población campesina ha desplazado la producción agrícola a otras áreas, en muchos de los casos vendiendo los terrenos a precios muy bajos para la construcción de sitios de recreación.

La dinámica de erosión y exposición de estas capas se ha presentado en diferentes regiones de América, en las cuales, diferentes investigadores de las ciencias del suelo han visto la necesidad de identificar e inventariar áreas expuestas y susceptibles a la erosión. También estudiar el comportamiento y características de estas capas y los suelos asociados, con el objeto de impedir el deterioro de éstos y planear e implementar prácticas de manejo y conservación.

Con los antecedentes de trabajos realizados en países como Ecuador, Guatemala y México, entre ellos los estudios realizados en el Instituto de Geología de la UNAM, sobre el comportamiento y características de los tepetates del Estado de Morelos, nació la motivación de estudiar materiales de Colombia, con el ánimo de llevar a cabo una comparación

con relación a los procesos de formación, evolución y exposición, de otro lado, profundizar en el estudio de zonas con exposición de capas endurecidas, identificadas hasta hoy en el país.

La estructura metodológica de la investigación comprendió una fase de antecedentes bibliográficos y recopilación de información de la zona, la cual llevó a la selección del área y ubicación de los perfiles. La segunda fase, correspondió a la descripción de los perfiles en campo y recolección de muestras, tanto del suelo como del material endurecido.

La siguiente fase se llevo a cabo en laboratorio, en la determinación de las características físicas, químicas y mineralógicas de todas las muestras y análisis selectivo en los materiales endurecidos a través de pruebas mecánicas, químicas, análisis micromorfológico y de microscopio de barrido. Por último la fase de interpretación y conclusión de los resultados, alrededor de la génesis y clasificación de los suelos y capas endurecidas.

La caracterización morfológica de los seis perfiles, muestra principalmente suelos muy jóvenes con formación de un horizonte A, ócrico, localizados sobre una toba, la cual evidencia procesos de alteración geoquímica y pedoquímica. También, fue identificado un perfil de mayor desarrollo de horizontes, el cual representa un perfil relicto del paisaje anterior a los últimos depósitos.

Los rasgos morfogenéticos de los suelos, expresados a través de las características físicas, químicas y mineralógicas señalan una semejanza en cuanto a textura, densidad, pH, CIC, saturación de bases y composición de arcillas, características correlacionadas con procesos iniciales de transformación físico-química de las cenizas félsíticas en un régimen de temperatura y humedad isométrico y ústico, respectivamente.

El estudio selectivo a nivel micromorfológico de los materiales endurecidos muestra evidencias de procesos pedogénéticos secundarios como son; eluviación e iluviación de arcilla y óxidos de hierro, y alteración de vidrio volcánico, interpretados como procesos adicionales de

endurecimiento, los cuales magnifican las características de endurecimiento del material subyacente. De otro lado, el análisis químico del material cementante compromete a los óxidos de sílice, arcilla y óxidos de hierro como expresión edáfica en la evolución de un horizonte endurecido.

Por lo tanto, la presencia de los horizontes endurecidos tiene que ver, inicialmente con los depósitos y consolidación de las cenizas, mediante procesos geológicos, en combinación de procesos pedológicos. Así, el camino evolutivo de estos suelos, probablemente y bajo las condiciones de transformación actuales, se evidencie la formación, en un tiempo mayor de un suelo sin restricciones, de un horizonte de diagnóstico duripán.

La morfología de los perfiles los ubica en la clasificación americana de suelos, en el orden Entisol, sin embargo los análisis químicos y las expresiones micromorfológicas, advierte sobre la presencia de procesos edafogénicos que brindan al perfil algunas propiedades de un suelo dentro del orden Inceptisol. De ahí que, se puede establecer la clasificación de estos perfiles en un nivel de intergrado entre Entisol e Inceptisol, a excepción del un perfil que se ubica en el orden Alfisol.



II. MARCO TEORICO

1. Capas Endurecidas

A. Antecedentes.

De manera general se denominan capas endurecidas a diferentes materiales que en el suelo actúan como barrera física, el endurecimiento ocurre ya sea por procesos de cementación o compactación. Morfológicamente son capas subsuperficiales encontradas a diferentes profundidades y cuyo espesor puede variar desde unos cuantos centímetros hasta varios metros.

Estas capas se encuentran asociadas, en la mayoría de los casos, a zonas de intenso vulcanismo del periodo Cuaternario y fisiografías de pendientes suaves (piedemontes), al pie de focos volcánicos (Quantin, 1992). Otro factor característico es el clima, marcado por una estación seca prolongada y drástica, que determina un régimen de humedad ústico en el suelo (en el trópico está tipificado al menos por una estación seca de tres meses) y régimen de temperatura isotérmico (temperatura media anual entre 15 y 22 °C). Muchas veces están localizados bajo condiciones de formación paleoambientales (Malagón, 1992).

En América Latina la formación de la gran cadena montañosa de los Andes, sobre la Costa Pacífica ha sido escenario de grandes áreas con exposición de capas endurecidas, evidenciadas por intensos procesos erosivos naturales y antrópicos. De acuerdo a la región estas capas se han integrado a diferentes usos culturales y agronómicos, descritos bajo diferentes nombres:

Los nombres regionales más conocidos son: tepetate, talpetate y cancahua. En México la palabra tepetate proviene del nahuatl, *teft*: piedra y *petatl*: cama, "cama de piedra", en Centro América la palabra talpetate es derivada de tepetate (Prat y Quantin, 1992) y, de forma

contradictoria, la palabra cancahua, en quechua traduce "tierra fértil". El glosario que se tiene de estos nombres es el siguiente:

México	Tepetate
Salvador	Talpetate
Honduras	Talpetate
Costa Rica	Talpetate
Colombia	Duripán, antes Hardpan
Ecuador	Cancahua
Perú	Hardpan, Sillares
Chile	Cancagua, Moromoro y Ñadis
E.E. U.U.	Silcretes, Duripán

Fuente; Zebrowski, 1992

Desde un punto de vista edáfico, en la formación de horizontes endurecidos, los elementos o compuestos minerales responsables de la cementación, son la sílice, carbonatos, sulfatos, sesquióxidos y arcilla, que los hacen merecedores de una mejor denominación técnica; llamados *duripán*, a los horizontes cementados por SiO_2 , *petrocálcico*, cementados por CaCO_3 , *petrogypico*, cementados por CaSO_4 y *petroféricos*, a los cementados por Al ó Fe (Soil Survey Staff, 1994).

En muchos de los casos la definición científica de estas capas, intenta describir los factores y procesos que intervienen en su formación, sin embargo, la mayoría está restringida a la descripción de los ambientes de formación y características morfológicas.

Por ejemplo, Flach *et al.* , 1992, consideran que el tepetate es un suelo volcánico endurecido bajo un clima isomésico o isotérmico, en el cual se pueden desarrollar diferentes materiales endurecidos y por lo general se incurre en el error de denominarlo *duripán*, indistintamente, ya que no se hace la referencia del tipo de mineral que lo cementa.

El talpetate lo define Prat y Quantin, 1992, como un horizonte endurecido, pardo olivo, de estructura masiva, atravesado por tubos biológicos, grietas y raíces. Desde el punto de vista edafológico el talpetate se considera como un Hardpan, es decir un material compactado,

aunque en la parte superior se han visto inicios de formación de un duripán, por lo que también es considerado un horizonte edáfico (Marín *et al.* , 1971).

Aeppli (citado por Sánchez *et al.* , 1987) establece que los duripanes son sedimentos o toba endurecida por óxidos de sílice, que por la erosión quedaron descubiertos y después de secarse se endurecieron irreversiblemente.

Vera y López, 1992, definen la Cangahua en Ecuador como un horizonte endurecido o cementado por procesos de lixiviación de la sílice liberada por el material vítrico de la superficie, hacia estratos inferiores, transportados a través de los materiales finos más permeables.

Thiry, 1992, define la silcreta como un horizonte endurecido por procesos de silificación pedogenética, mientras que, Nimlos y Ortiz, 1987, utiliza en forma indistinta los términos "silcretas", "duripán" y "grey billey" para hacer referencia a los panes endurecidos por sílice, y denomina "caliche" y "calcreto" a los horizontes cementados por carbonatos de calcio.

Recientemente, Quantin, 1996, precisa una definición de la Cancahua, como una toba piroclástica alterada (horizonte C) en la base de un suelo, proveniente del mismo material eruptivo, pero constituida por ceniza consolidada.

Es importante resaltar en ésta investigación, que cuando se habla de horizontes endurecidos de origen volcánico, en muchos casos se tratan de materiales vulcano-sedimentarios que se endurecieron mediante procesos diagenéticos rápidos, los cuales poseen más características de capas que de horizontes propiamente dichos y que mediante diferentes mecanismos de alteración han dado origen a unos suelos y colateralmente han cementado en forma secundaria dichos materiales.

Las afirmaciones anteriores conducen a establecer un panorama muy general de las diferentes capas endurecidas, relacionadas principalmente, con el material parental y el régimen climático.

El estudio de estas capas puede ser abordado por diferentes áreas de la edafología. Se han reportado trabajos en fertilidad, taxonomía y pedología; en este sentido también se han planteado diferentes hipótesis sobre su origen, entre ellos el pedológico, geológico o una combinación de ambos procesos (Flores *et al.*, 1991)

B. Clasificación.

La Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1994), clasifica cinco tipos de horizontes endurecidos de origen pedológico, en función de las propiedades físicas y químicas, cementantes y profundidad, definidos como:

- Duripán: (del Latín *durus*, duro). Es un horizonte subsuperficial cementado principalmente por sílice y algunos elementos en menor cantidad como óxidos de hierro y carbonatos de calcio.
- Fragipán: (del Latín *fragilis*, quebradizo). Es un horizonte natural subsuperficial no cementado de textura limosa o arenosa, cuando está seco posee una consistencia dura y muy dura, y en húmedo moderadamente débil o frágil.
- Horizonte petrogypico: Horizonte iluvial cementado por acumulaciones de sulfato de calcio secundario con o sin otros agentes cementantes.
- Horizonte petrocálcico: (del griego *petra*, roca). Horizonte iluvial cementado o endurecido, en el cual se han acumulado carbonatos de calcio secundarios y magnesio u otros carbonatos.
- Plinita. (del griego *plinthos*, ladrillo). Es un horizonte con una mezcla de arcilla, arena con cuarzo y arcilla transformado irreversiblemente a un pan endurecido por medio de la acción de agentes cementantes como los óxidos-hidróxidos de Fe y Al.

De origen geológico se conoce la toba o ceniza compactada, definida por Fisher y Schmincke (citado por Quantin *op cit.*), como una ceniza consolidada, con diámetro de los clastos (fragmentos de lava o fenocristales piroclásticos) menores a 2 mm, conteniendo cualquier elemento grueso (cinerita o lapilli). La consolidación de estos materiales se debe a procesos diagenéticos rápidos, bajo condiciones de humedad, que dan el carácter endurecidos al material.

C. Caracterización.

Las características físicas, químicas y mineralógicas de estos horizontes son variables, principalmente por los tipos de cementantes que los originan y los procesos de formación que influyen, sin embargo, existen algunas características que permiten identificarlos.

a. Características Físicas.

Las propiedades físicas están relacionadas principalmente con el material endurecido, en el que se describen las características de los duripanes y los fragipanes.

◦ Estructura

Las capas endurecidas cementadas, carecen de estructura desarrollada y se presentan como masas consolidadas, en algunos casos en estructuras prismáticas o columnares grandes, que se evidencian luego de fuertes procesos erosivos. Guerrero *et al.*, 1992, afirman que en la descripción de campo de un duripán se aprecia una masa continua y compacta, aunque al estar expuesta puede adquirir forma columnar o tiende a fragmentarse en bloques de dimensiones variables por la acción de cambios de temperatura y humedad.

La Soil Survey Staff (Soil Taxonomy, *op cit.*), menciona que para el fragipán la estructura es masiva, débilmente cementada hasta moderadamente fuerte. En otros casos su estructura es de tipo prismático grueso muy cercana a bloques muy gruesos. Peña y Zebrowski, 1992, mencionan que los tepetates, sobre todo, los no calcáreos, son depósitos consolidados y poco alterados, a tal grado que sólo alcanzan a desarrollar subestructuras.

◦ Textura

En tepetates no calcáreos de México, el contenido de arcilla varía entre 25 y 54%, correspondiente a la clasificación T2 y T3 (sin y con carbonatos de calcio), esta última indica materiales arcillosos de fuerte variación (Quantin *et al.* 1993). Para los fragipanes la Soil Taxonomy (*op cit.*) considera que los contenidos de arcilla son menores a 35%, de textura franca (franco limosa o franco arenosa). La estimación de esta propiedad, en el campo, no es muy confiable debido a la acción de los diferentes agentes cementantes.

- Densidad aparente

Esta es una propiedad que caracteriza las capas endurecidas, ya que éstas poseen mayor densidad que el resto de horizontes. El fragipán al igual que el duripán es un horizonte con mayor densidad que los subyacentes (Soil Survey Staff, op cit.), característica relacionada con condiciones de permeabilidad lenta y muy lenta.

Flach *et al.*, op cit., menciona que la densidad aparente de los tepetates de México es mayor de 1.0 g/cm³ y Quantin *et al.*, 1993) señalan que el valor promedio es 1.45 g/cm³.

- Consistencia

Esta propiedad permite diferenciar en campo el fragipán del duripán. En el fragipán la consistencia es dura o muy dura, en seco, y quebradizo en condiciones húmedas, mientras que, el duripán siempre es duro.

Smeck y Cidkosz; Pickcrim y Veneman (citados, por Lindbo *et al.*, 1995), mencionan que la fragilidad de los fragipanes es una propiedad muy subjetiva ya que depende de las condiciones de humedad del material y el tiempo de haber sido tomada la muestra, de ahí, la necesidad de diferenciar los materiales de acuerdo al contenido de humedad.

b. Características Químicas.

Etchevers *et al.*,1992, en estudios de caracterización de los tepetates de México, reportan valores de materia orgánica y nitrógeno total, muy bajos, debido a la ausencia, casi absoluta, de residuos vegetales. El contenido de fósforo extractable es prácticamente inexistente, el cual limita, adicionalmente, el crecimiento de las plantas.

En el contenido de bases intercambiables es notable la presencia de calcio y magnesio, así como también potasio, que se encuentra en cantidades importantes. Cabe mencionar, que las características tanto físicas como químicas varían de acuerdo al tipo de material, clima, relieve y material cementante.

c. Estabilidad de los cementantes

Como se viene anotando, son diferentes las propiedades que permiten caracterizar las capas endurecidas, entre ellas, la estabilidad, la cual relaciona el tipo de material cementante y el grado de cementación en forma cualitativa. Es una prueba que se basa en la reacción de un ácido o base sobre un agente cementante.

El duripán (capa cementada por sílice) se colapsa, al menos un 50% del volumen, en tratamientos alternados de ácido y álcali (KOH o NaOH), mientras que un fragmento de fragipán seco (material cementado por arcilla o compactado), se colapsa o fractura en agua en menos de diez minutos, Soil Survey Staff, op cit. El criterio de la FAO-UNESCO, 1994, agrega la condición de que el fragipán posee una resistencia a la penetración alta, mayor de 50 KN/m². Nimlos (citado por Ruiz, 1987) menciona que el duripán se ablanda en KOH concentrado y caliente, acabando por desmoronarse. Las muestras endurecidas, tanto por sílice como por carbonatos requieren tratamientos alternados (HCl y KOH).

d. Mineralogía.

En diferentes estudios petrográficos de suelos derivados de cenizas volcánicas de diferente composición mineralógica, bajo condiciones climáticas distintas, se ha encontrado una estrecha similitud, en el caso de suelos con horizontes endurecidos esta relación es igualmente establecida.

La presencia de minerales primarios y secundarios de las capas y horizontes endurecidos, está relacionada principalmente con la naturaleza del materia parental y los productos de alteración de ésta, que se generan bajo diferentes condiciones.

Las cenizas volcánicas poseen en su composición mineralógica, sílice en forma de vidrio, cuarzo, feldespatos, alfiboles, piroxenos y fragmentos líticos, que se clasifican de acuerdo en su contenido de sílice en: félsicas, intermedias y máficas (Shoji *et al.*, 1993).

Ya que las cenizas son predominantemente silíceas, sus productos de alteración pueden seguir la siguiente secuencia de alteración, de acuerdo a las condiciones del medio, Fig. 1.

En estudios de silcretas pedogenéticas, en Estados Unidos, Thyri, op cit., menciona la presencia de dos fases mineralógicas, en el suelo, ópalo -CT (cristobalita-tridimita) y arcillas en la misma proporción, mientras que en la "silcreta" se identifica una fuerte acumulación de ópalo CT, , claramente alternada con delgadas laminillas de arcilla, lo que evidencia altos contenidos de sílice en el medio y procesos de eluviación e iluviación de arcilla.

Por otro lado, Besoain, 1985, bajo condiciones de mayor humedad indica la presencia de alofanos asociados a sílice no cristalina a cuarzo, en el suelo desarrollado sobre el "fierrillo" y sobre éste, presencia de ferrihidrita y sílice no cristalina, lo cual está asociado a condiciones de mayor desbasificación. El mismo autor, para materiales endurecidos, denominados "ñadis" reporta presencia específica de filosilicatos dioctaédricos y en algunos casos presencia de alofano.

Reportes mineralógicos recientes de Canchagua en Ecuador, determinan en la fase cristalina presencia abundante de plagioclasas, dentro del rango andesina-albita, además, cristobalita y vidrio desvitrificado, en una proporción de un 30%. Otros minerales reportados son feldespatos de potasio y magnetita. En análisis de las arcillas se encontró principalmente arcillas amorfas y trazas de montmorillonita Espinosa (citado por Vera y López, op cit.).

Trabajos como los de Peña y Zebrowski, 1992; Hidalgo *et al.*, 1992; Dubroeuq, 1992; Flores *et al.*, 1992 y 1996., reportan haloisita en la mineralogía de arcillas de los tepetates de México, bajo climas relativamente húmedos, algunas veces, metahaloisita (10Å). Además, Rossignot *et al.*, 1992 mencionan también la presencia de cristobalita. En climas más secos o muy secos la esmeclita está presente de manera muy frecuente. Esta misma secuencia de minerales, con relación al clima, se ha destacado en los trabajos realizados en talpetates de Nicaragua (Prat y Quantin, op cit.).

Secuencia de alteración edáfica: Pedogénesis

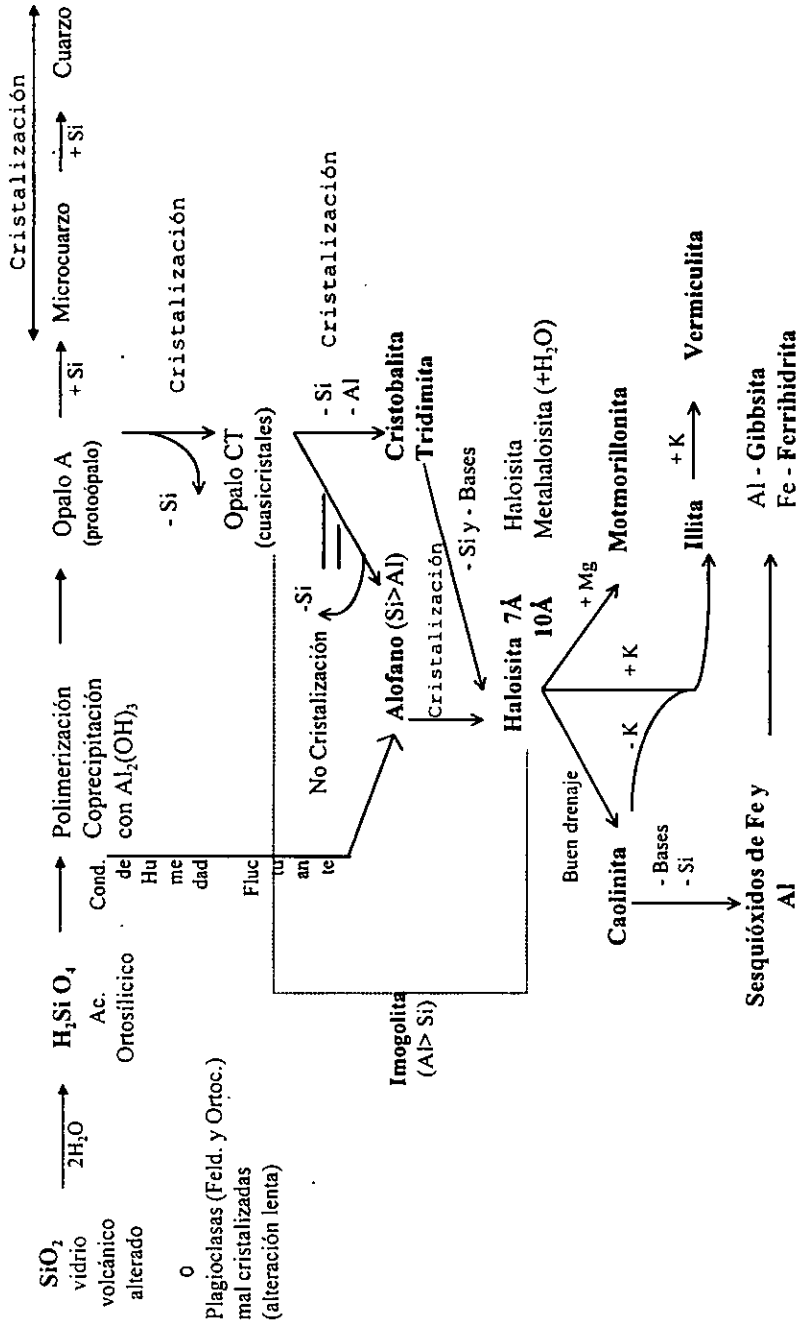


Figura 1.

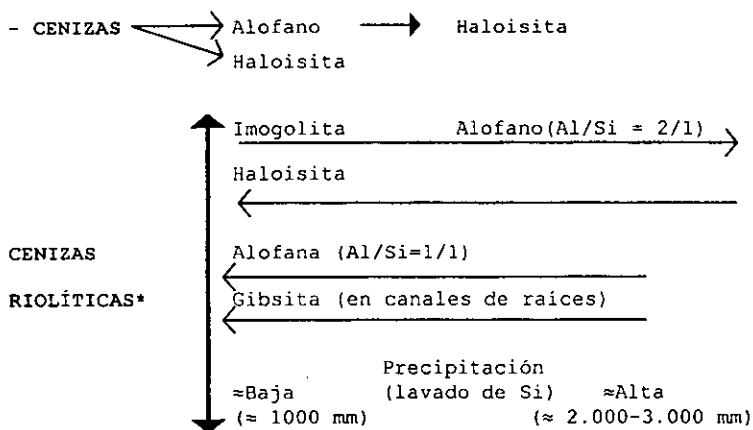
En este orden de ideas, la mineralogía de los horizontes endurecidos puede establecerse bajo una secuencia general, relacionada con la toposecuencia y el clima; afirmando que los procesos débiles de transformación se presentan bajo condiciones tropicales secas y en condiciones de mayor humedad, las pérdidas de sílice y bases son muy claras.

En la alteración de las cenizas volcánicas bajo climas secos, es notable la presencia de esmectita y en condiciones de mayor humedad a diferentes niveles de temperatura y altura, los minerales de arcilla más frecuentes son haloisita (7Å) y/o metahaloisita (10Å). A medida que la temperatura es más baja, generalmente en zonas muy altas con mayor humedad, el alofano es el mineral de mayor presencia. Es de destacar que la haloisita es el mineral más frecuente en estas capas ya que su presencia está relacionada principalmente con la presencia de cenizas volcánicas, circunscrita a dos tipos de origen:

A partir del alofano, por reordenamiento molecular y concurso de iones de sílice y por alteración de minerales primarios. Parfitt, 1984, en estudios recientes de mineralogía de suelos volcánicos, afirma que la haloisita se puede formar también, directamente de las cenizas volcánicas y no a partir de alofano. Este proceso es posible a través de la deshidratación parcial del vidrio volcánico, en situaciones de baja lixiviación, en la cual, la concentración de sílice es relativamente elevada. Cuando se presenta fuerte lixiviación y menor concentración de sílice y mayor de aluminio, se forman principalmente arcillas tipo imogolita y el alofano, directamente de las cenizas depositadas, al igual que, la formación de ferrihidrita, Fig. 2, Wada y Russel *et al.* (citado por Parfitt, *op. cit.*).

Otro mineral importante en estos horizontes es la metahaloisita (10Å), que se origina por hidratación de la haloisita. Para que este proceso tenga lugar es necesario una alternancia de estaciones secas y húmedas.

Las cenizas volcánicas son materiales bastante propicios para la formación de arcillas esmectitas (montmorillonita), las cuales evolucionan en condiciones semiáridas y en situaciones de drenaje restringido. Esto lleva a afirmar que la presencia de arcillas esmectíticas en los duripanes se debe a una alteración *in situ* de las cenizas volcánicas (Besoain, *op. cit.*).



*Si se considera la Si en solución se puede aplicarse a Cenizas andesíticas

Figura 2.

e. Petrografía.

El estudio micromorfológico de las capas endurecidas ha llevado a observar diferentes rasgos o huellas que permiten determinar algunas características en los procesos de formación, ya sea, heredados o de transformación.

McCracken y Weed, 1983, establecieron algunos criterios micromorfológicos para diferenciar el fragipán de otro tipo de horizontes frágiles inducidos por el hombre. Entre ellos, que el fragipán posee una matriz arenosa de empaquetamiento cerrado, poca cantidad de arcilla y componentes apreciables de feldspatos y micas. Todos los panes frágicos contienen poca cantidad de arcilla, pero sólo en el fragipán, ésta se encuentra orientada y con puentes intergranulares de feldspatos o micas.

En la descripción micromorfológica de talpetates se observa una variación en el color, de oscuro a anaranjado, producto de la alteración del vidrio volcánico y la pérdida de sílice.

Frecuentemente presenta plagioclasas, fragmentos de basaltos y piroxenos que forman el "esqueleto" del material, el cual no interviene casi en el proceso de evolución.

La matriz del material está formada por tramos pequeños de partículas basálticas que están afectando el proceso de transformación a palagonita. De esta descripción Marín *et al.*, 1971 concluyen que el tepetate petrográficamente es una toba mixta de palagonita.

Oleshcko, 1992, en sus trabajos micromorfológicos sobre tepetates de México establecen tres patrones de revestimientos de arcilla, los cuales le permiten asociarlos a diferentes procesos de formación de minerales, ellos son: seudomórficos, de revestimiento y de fábrica vértica.

El patrón seudomórfico que presenta rasgos pedológicos amorfos o criptocristalinos e isotrópicos, bajo luz polarizada, da indicio de procesos de formación de arcilla "in situ", regularmente asociados a una fábrica textural argílica mátrica, es decir con presencia de arcilla a través de la matriz. El segundo patrón, de revestimiento, está caracterizado por rellenos densos, completos o incompletos de los macroporos y revestimientos arcillosos laminares típicos, en algunos casos, con alternancia de capas de arcilla pura y de limo o material limo-arcilloso.

La arcilla posee diferente grado de orientación, que permite a su vez una subdivisión de este tipo de patrón; subpatrón de relleno de arcilla o "fábrica argílica frágica" y de revestimientos laminares de arcilla y relleno compacto de arcilla y sílice. Este patrón no indica un proceso exacto de formación, pero sí está relacionado con mecanismos de flujos preferenciales de agua.

El último patrón llamado "fábrica argílica vértica", que se presentó en ciertos paleosuelos arcillosos, con predominio de esmectita dentro de la matriz del suelo. Los indicadores micromorfológicos son rasgos pedológicos relacionados con los procesos alternados de expansión y contracción de arcillas y con el proceso de iluviación.

La "fábrica" es un parámetro de descripción micromorfológico, definida, como la organización total del suelo y expresada por el arreglo espacial de los componentes del mismo. Su



análisis es importante ya que resalta los rasgos específicos que pueden relacionarse con el origen y distribución de los cementantes.

En la descripción de la fábrica de algunos tepetates del estado de Aguascalientes en México, Orozco *et al.*, 1992, destacan la diferencia de éstos, con horizontes no cementados, la distribución relacionada es porfirica, fábrica de birrefringencia con poro y grano-estriada y microestructura de subangular a masiva.

Esta última establece un indicador de una reorganización completa de la masa basal de las capas endurecidas el cual puede ser indicio de uno de los mecanismos de cementación en la génesis de los suelos.

Los trabajos de Hidalgo *et al.*, op cit., sobre génesis de los tepetates describen una microestructura masiva, fragmentada por algunas fisuras de retracción y por penetración de agentes biológicos, con una matriz compuesta básicamente por vidrios volcánicos que pueden corresponder a procesos de alteración incipiente.

Los rasgos pedológicos se reúnen en revestimientos y rellenos al interior de los tubos biológicos, poros vesiculares y nódulos ferruginosos, mangánicos o calcáreos. Los revestimientos en los tepetates son microlaminares de tipo ferroargilanes, donde la arcilla dominante es la haloisita.

D. Génesis.

La formación de las capas endurecidas (duripán y fragipán) es un tema muy discutido, ya que éstas, se han desarrollado bajo diferentes condiciones geodafoclimáticas y procesos físico-químicos, que caracterizan cada tipo de perfil.

Alrededor de su génesis, diferentes autores han expuesto hipótesis, en las cuales relacionan el clima y el material parental (cenizas volcánicas), como los principales factores que intervienen en su formación.

Una de las principales hipótesis centraliza la discusión, sobre los procesos de formación de los duripanes y fragipanes, en las cuales se propone la formación geológica, pedológica o una combinación o superposición de las dos (Flores op cit). De origen geológico, como resultado de las depositaciones volcánicas iniciales; pedológico, producto de alteraciones físico - químicas del material original y finalmente capas inicialmente originadas a partir de procesos geológicos, a los que le continúan procesos pedológicos secundarios.

En la formación de materiales endurecidos, los procesos geológicos han tenido gran importancia, básicamente por la depositación de cenizas volcánicas, sin embargo esta no es una condición determinante. Existen algunos autores que están apoyados en los tiempos geológicos y factores ambientales para explicar el origen de algunas capas endurecidas, es el caso de los fragipanes; la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975), propuso que estos materiales se originaron por el peso de glaciares y otros eventos del Pleistoceno. La dureza de estas capas cuando están secas está relacionada con el empaquetamiento de las uniones de arcilla, y la alta densidad aparente, al peso de los glaciares, en otros casos por los procesos de expansión y contracción de las arcillas.

Marsan y Torrent, 1989, mencionan que el fragipán se desarrolla en depósitos antiguos de loess que tienen baja dureza, de estos derivan agentes agregantes interparticulares, esencialmente óxidos libres de hierro, responsables de la formación de un horizonte frágil.

En México, Valdez, 1970, describe la génesis del tepetate como una serie de cambios de clima seco-frío y húmedo-caliente a fines del Terciario y parte del Cuaternario, produciéndose glaciaciones (provocando formaciones de carbonatos) y deglaciaciones (dando lugar al arrastre de material).

Quantín, op cit., cita que las tobas se originaron a partir de cementos geológicos en climas subáridos a los cuales se le suman procesos pedológicos que aporten características de endurecimiento a estos materiales. Su génesis es debida a una cementación por fusión superficial

de los vidrios al momento del depósito o a la alteración de sus productos amorfos de ópalo, palagonita o incluso minerales de zeolitas.

Faivre y Gaviria, 1992, explican las posibilidades de endurecimiento de estos materiales por las variaciones climáticas en los Andes Colombianos, debido a cambios climáticos globales que han sufrido los materiales depositados los últimos 10,000 años, acompañados de una disminución de los caracteres que se expresan en la alteración paralela al perfil de desecamiento por el clima. Otra hipótesis con relación al endurecimiento, son los cambios ligeros en la composición de los productos piroclásticos, de naturaleza mineralógica y también textural.

Apoyando las hipótesis pedogenética, Flach, 1969, propone que los duripanes se desarrollan a partir del prolongado y lento intemperismo de los feldespatos y minerales ferromagnesianos o también del rápido intemperismo del vidrio volcánico. Apoyando esta propuesta, Keller (citado por Flach, op cit.), demostró que en los materiales piroclásticos la sílice se libera más rápido que los feldespatos, constituyéndose en el principal responsable de la cementación, favoreciendo la formación del horizonte pedogenético.

En forma más general, Franzmeier *et al.*, 1989, mencionan que en la formación de las capas endurecidas, los minerales silicatados se intemperizan en la superficie del horizonte y alcanzan sus productos de alteración en los periodos húmedos. La solución rica en sílice es lixiviada y llega a depositarse sobre los materiales menos intemperizados. En este planteamiento, los procesos de formación que intervienen son: la eluviación de los horizontes superiores y la iluviación en los horizontes inferiores, adaptada más frecuentemente en suelos formados bajo materiales antiguos.

En esta misma vía, la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975), relaciona la ocurrencia de los duripanes en condiciones de clima mediterráneo subhúmedo, en climas áridos, en suelos que están usualmente secos o que tienen una estación seca. El régimen de humedad del suelo debe permitir que la sílice soluble pueda ser lixiviada hacia horizontes subsuperficiales, pero no en forma lateral.

Una hipótesis pedogenética en la formación de fragipanes es la que propone Karathanasis, 1989. El proceso se origina a partir de la precipitación de amorfos de SiO_2 sobre la superficie de amorfos de aluminosilicatos desde una solución saturada de sílice, durante periodos de desilificación posteriormente alcanzan un endurecimiento irreversible y forman el fragipán. La intensidad de estos procesos es controlada por las características geomorfológicas del sitio que determinan el grado de desarrollo del fragipán.

En un sentido sistemático y favoreciendo la hipótesis que propone una combinación de procesos geológicos y pedológicos, otros autores han hecho los siguientes aportes:

Zebrowski, 1992 y 1996, hace una recopilación de varios autores cuyos estudios están basados en la génesis de formaciones volcánicas endurecidas; los cuales consideran que el material depositado es el factor más importante en el desarrollo de estas capas, frecuentemente tobas o brechas, a menudo intercaladas con lluvias de lapillis y este endurecimiento es reforzado por procesos edafológicos secundarios como: acumulación de arcilla, sílice hierro o caliza en regiones secas. Sin embargo, a veces los procesos edafológicos, pueden ser los únicos causantes del endurecimiento de los horizontes, con es el caso del fierrillo en los suelos Ñadis de Chile y algunos tepetates de México.

Oleshcko, op cit., especifica algunos factores como condicionantes para la formación de una capa endurecida: a) depósito periódico de materiales volcánicos b) circulación de soluciones enriquecidas con calcio, hierro, sílice o arcilla dentro del sistema c) presencia de pantallas texturales dentro de los perfiles y d) tasas altas de erosión hídrica.

Apoyando estas hipótesis, Quiñones, 1987, propone dos fases en la formación de los duripanes; 1) la solidificación de cenizas volcánicas o nubes ardientes, cuya composición es básicamente material vítreo 2) intemperización del vidrio volcánico dando origen al ácido silícico, el cual penetra a través del perfil para formar el material que le da la cementación. Para este caso, el autor afirma que la fuente de sílice en la formación del horizonte en un proceso edáfico, proviene de

la solución del suelo como ácido ortosilícico monomérico $\text{Si}(\text{OH})_4$, en concentraciones de 7 a 80 mg g^{-1} .

En este mismo sentido, Quantin *et al.*, 1993, establecen una interrogación alrededor de la consolidación del material, en tepetates de México de tipo T2a y T3 (tepetates con o sin carbonatos). ¿Esta se produce en el momento o después de la depositación? Es decir, es de origen geológico o pedológico.

La pedogénesis es favorecida por la presencia de rasgos edáficos, de materiales tales como; acumulación de arcilla, óxidos de hierro y sílice correlacionado con el régimen climático ústico. Sin embargo y visto de otra manera, con la compactación de la toba original, esta redujo la velocidad de alteración y provocó acumulación de arcilla, sílice y óxidos de hierro y hasta calcita, dando origen a la serie T2a, que se localiza en la parte baja de la climotoposecuencia.

Con una tendencia más específica de los procesos, Nimlos y Ortiz, 1987, establecen que la cementación por sílice se lleva a cabo por vía geológica y pedológica, en el caso de la carbonatación, éste es un proceso netamente pedológico. Aclarando que la cementación primaria de la sílice ocurre durante la consolidación geológica y la cementación secundaria puede darse por sílice o por carbonatos de acuerdo a la composición del material y las condiciones de alteración.

E. Procesos de formación.

En el contexto del tema de la génesis, el estudio particular de los procesos de formación de los horizontes endurecidos es importante, ya que permite entender las diferentes vías de transformación de los materiales geológicos que los originan.

Como se ha referido anteriormente, el endurecimiento de los materiales volcánicos puede darse por vía geológica o pedológica, Dubroeuick *et al.*, 1989. Cada una de éstas se caracteriza por llevar a cabo procesos físico-químicos, que involucran mecanismos o procesos secundarios de alteración y transformación de minerales.

En forma general los diferentes mecanismos relacionados con la formación de horizontes endurecidos se tratan a continuación, teniendo en cuenta que cada uno de ellos es favorecido por el ambiente en que esté se lleve a cabo.

Dentro de la geogénesis los procesos de endurecimiento pueden darse de acuerdo a los siguientes mecanismos: flujos piroclásticos, nube ardiente, hidromagmáticos y lahares (coladas de barro), Fisher y Schmincke (citado por Quantin, op cit).

Los flujos piroclásticos forman ignimbritas a partir de gases ardientes a temperaturas de 700 - 900°C debido a una fusión superficial de los vidrios y soldadura de los piroclásticos (lapilli y pómez), con estructura fluidal, sin presentar cementantes de neoformación, ni alteración de los vidrios.

Las formaciones hidromagmáticas, piroclastos de tipo cinerita, toba, brecha y nódulos de acreción de cenizas, son consolidadas por alteración hidrotermal a temperaturas de 200 a 500 °C, que llevan a la disolución de los vidrios, por la presencia de los gases y fluidos ácidos ($H_2O_2 + HF$, HCl , CO_2 y otros) y cementados por los productos de alteración, que en la mayoría de los casos por sílice, arcilla y óxidos metálicos. Los endurecimientos de este tipo tienen una permeabilidad leve o nula y dureza variable.

Los lahares, se presentan de dos tipos, fríos, que son el resultado de la fusión de un glaciar después de una erupción volcánica y lahares calientes, se originan a partir de la ruptura de un lago de aguas calientes (menor de 100 °C) y ácidas, de un cráter volcánico. Ambas formaciones presentan poca cementación.

En la historia geológica de México por ejemplo, se describe la formación de muchas de las capas endurecidas como un conjunto de dos tipos de depositación, un suave flujo de lava y una explosión violenta de agua, gas y ceniza candente que al depositarse se solidificó y formó depósitos conocidos como "flujos de ceniza", Ross y Smith (citado por Nimlos, 1989).

Este proceso está en función de la temperatura de los fluidos y de la compactación durante la depositación. Al parecer la temperatura en el fondo del fluido es alta, por lo tanto en el momento de la depositación se da una compactación por los minerales fusionados de sílice en forma de la roca denominada "toba soldada", si estas condiciones de temperatura varían, la consolidación es menor. Fenner (citado por Nimlos, 1989), globalmente describe un proceso geológico en que la cementación por sílice se da por cristalización durante una fase de vapor.

En el desarrollo pedológico de materiales endurecidos son conocidos los procesos de silificación, carbonatación, argilificación y acumulación de sesquióxidos, que pueden prevalecer mediante mecanismos de alteración química: hidrólisis, hidratación, óxido- reducción, eluviación - iluviación, quelatación; mecanismos físicos como glaciaciones, expansión y contracción, cristalización, y otros mecanismos que se presentan por efectos térmicos.

a. Silificación

La silificación, es un proceso en el que la sílice es depositada sobre los poros y su impregnación en la matriz arcillosa se presenta como una acumulación absoluta de sílice. Este es uno de los procesos más importantes en las formaciones endurecidas (Thiry, op cit.).

Weyl, 1950 (citado por Gutiérrez, 1988), establece la silificación como un proceso en donde la cementación por sílice está dada por el incremento de la cubierta de sílice en los granos de cuarzo antiguos, el cual denomina "presión de solución", en el cual son llevados a cabo:

- 1) Mecanismos de alta presión desarrollados en los puntos de contacto entre los granos de cuarzo, condición que conduce a un incremento de la solubilidad en estos puntos.
- 2) Mecanismos de disolución de la sílice, donde hay liberación de agua en el espacio poroso, generando como consecuencia una solución sobresaturada que conlleva a la precipitación de la sílice sobre la superficie de las partículas, reduciendo la porosidad del material.

Millot (citado por Gutiérrez, 1988), señala que en este proceso debe existir una semejanza química entre el compuesto y la superficie de las partículas de la fase dispersa.

cutáneas de arcilla e hidróxidos de aluminio, en condiciones de pH extremadamente bajos. Para que la sílice se remueva mediante hidrólisis de los silicatos y aluminosilicatos en forma de ácido monosilícico simple debe existir una concentración mayor de 5 ppm y pH entre 5 y 8, esta reacción se presenta siempre en alternancia de períodos secos y húmedos.

La sílice en la solución del suelo es controlada por mecanismos de deshidratación que a su vez, incrementan la concentración de sílice y disminuyen la absorción y precipitación. Por lo tanto, la depositación de la sílice está determinada por la profundidad del movimiento del agua y por la superficie de absorción. Pettjohn (citado por Gutiérrez, 1988), apoya este mecanismo y señala que la sílice liberada en este proceso, pasa al agua sobresaturándola hasta concentraciones de 80 ppm.

- Recristalización o transformación de sílice opalina a microcuarzo formando materiales duros bajo la influencia de la circulación del agua. Este mecanismo está controlado por la percolación.

Cuando se presenta percolación muy rápida y/o intermitente prevalecen condiciones de disolución de la sílice, mientras que, si hay condiciones de percolación media, hay recristalización y formación del cuarzo.

En condiciones de percolación baja, no es posible la transformación de la sílice; la temperatura, en este caso, influye indirectamente ya que afecta la actividad del agua.

- La química de la solución: el papel de los cationes es inhibir la cristalización del cuarzo, tal es el caso de impurezas de calcio, aluminio y hierro en la solución que puede actuar negativamente en la transformación de cuarzo microcristalino a calcedonia.
- La porosidad es un factor importante en el control hidrodinámico de la percolación, de esta manera a mayor percolación mayor disolución del ópalo.

En muchos de los casos, el endurecimiento está dado por la cementación por sílice y carbonatos, para el cual Blank y Fosberg, 1991, proponen dos mecanismos de alteración:



A) Incremento de la solubilidad causada por un aumento en la presión entre granos dado por aumento en la superficie de la energía libre de Gibbs, igual al propuesto por Weyl (citado por Gutiérrez, op cit.).

B) Los diferentes endurecimientos se presentan por un sistema cerrado de $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$, elevando el pH y trayendo como consecuencia el incremento de la solubilidad de los aluminosilicatos.

Los resultados de este mecanismo varían de acuerdo a diferentes condiciones. Reheis, 1986, observó que a un pH alto y mayor energía libre de Gibbs se precipita calcita, ésta es reemplazada por aluminosilicatos y éstos por un silicato amorfo precipitado.

Finalmente, Chadwick *et al.* (Citados por Blank y Fosberg, 1991), concluyen que la sílice y el carbonato de calcio se precipitan divididos en dos sitios; la sílice se distribuye en el plasma y la calcita en los poros empaquetados, ya que las propiedades cristalóquímicas de estos minerales no permiten que se superpongan.

Chadwick y Hendricks (citados por Gutiérrez, 1988), señalan que la cementación por sílice es el resultado entre la cantidad de sílice utilizable para la absorción y la cantidad de superficie revestida por ésta. La sílice en forma de $(\text{SiOH})_4$ se evapora entre los poros pequeños, luego es absorbida por las arcillas, sesquióxidos y superficies de minerales primarios intemperizados y finalmente se precipita cementando las partículas.

Otro mecanismo, propuesto por Flach *et al.*, 1969, es que la precipitación de la sílice en el suelo está dada por la concentración de $\text{Si}(\text{OH})_4$, debido a la remoción de agua por las raíces y en menor grado por evaporación.

El modelo diagenético de silicificación, más claro, es el de intemperismo de los feldespatos y otros silicatos por hidrólisis Siever (citado por Gutiérrez, op cit.). Otro, por la traslocación de sílice acumulado en forma de cutánes, nódulos de ópalo A inorgánico, provenientes de la disolución



biogénica del ópalo, microfósiles silíceos, vidrios piroclásticos, cuarzo preexistente o minerales de arcilla en condiciones ambientales áridas y semiáridas.

Otro proceso que origina materiales endurecidos es la cementación de óxidos metálicos, como el descrito en la formación del fierrillo en Chile, cementación por hierro, que involucra procesos de traslocación por iluviación de hierro, manganeso y materia orgánica. En estos procesos intervienen dos mecanismos:

- 1) Migración de Fe^{++} (también Mn^{++}) determinado por el cambio de potencial bajo, que existe en los horizontes superiores y determina la migración de Fe^{++} , hasta un nivel donde el potencial es más elevado, lo que puede producir la precipitación de Fe^{+++} .
- 2) Depositación de solutos en las paredes de los poros capilares por efecto del cambio de porosidad desde un espacio poroso fino a un espacio poroso grueso (Luzio y Saavedra, 1992).

Por otro lado, Alexander y Cady (citado por Flach *et al.*, op cit.), mencionan que el endurecimiento en horizontes enriquecidos por hierro, involucra dos procesos:

- 1) Aumento del grosor, por adición o enriquecimiento local de goethita cristalina
- 2) Cristalización y deshidratación de minerales en las que describen la bohemita deshidratada y la hematita, esto sí se exponen a periodos de humedecimiento y secado.

F. Suelos asociados.

En el tema de la génesis y los procesos que involucran el desarrollo de las capas endurecidas, existe una fuerte tendencia a asegurar que estos materiales son el resultado de depósitos piroclásticos (cenizas volcánicas), seguidos de acumulación de agentes cementantes, producto de diferentes mecanismos pedogénéticos, relacionados principalmente con las condiciones ambientales.

Los suelos asociados a los horizontes endurecidos en la mayoría de los casos están relacionados con las condiciones del clima, ya que éste es un factor crítico en la alteración de las cenizas volcánicas.

Los suelos de origen volcánico que se evoluciona en ambientes áridos y semiáridos son aridisoles. Bajo condiciones de humedad y buen drenaje las cenizas volcánicas tienden a formar andisoles, con presencia de materiales amorfos, arcillas haloisita y esmeclita. Si el drenaje es restringido hay tendencias a formas de gleyzación, y si las cenizas son gruesas o arenas volcánicas constituyen Vitrandepts, Regosoles o Rankers (Flach, op cit. y Quantin op cit.).

Así, bajo cambios de los factores ambientales se desarrollan diferentes tipos de suelo, sin embargo, en la mayoría de los casos las capas endurecidas se alteran y evolucionan para formar suelos con características del orden Inceptisol.

Luzio y Saavedra, op cit., afirman que los horizontes endurecidos en Chile se presentan en suelos que no tienen ninguna utilización agrícola (zona desértica) o con limitaciones de uso (zona húmeda y de clima mediterráneo) clasificados como Placaquands.

Flach *et al.*, op cit, reporta presencia de duripanes en suelos de EE.UU. en dos situaciones: Xerals sobre paisajes estables muy antiguos del Pleistoceno o Terciario, en clima mediterráneo y Argids y Orthids más jóvenes del Pleistoceno tardío y Holoceno, en medios desérticos, asociados con presencia de cenizas volcánica u otros materiales piroclásticos.

Guerrero *et al.*, 1992, reportan grupos de suelos que subyacen a los tepetates en México de tipo calcáreo, duripán y petrogypsico como Xerosoles, Litosoles, Vertisoles, Feozems y Cambisoles. En Ecuador sobre la Cancahua existen suelos que son clasificados como Andosoles o Cambisoles (FAO- UNESCO, 1974) Andept o Inceptisoles (Soil Survey Staff, 1975; Creutzberg *et al.*, 1990).

En Colombia, los suelos asociados a los horizontes endurecidos que se han identificado hasta hoy, están relacionados con diferentes depósitos, clasificados en la mayoría de los casos en el orden Alfisol.

Sobre tobas, bajo condiciones ácidas se encuentran los suelos Fersialíticos y en condiciones alcalinas y alcalinoterreas, suelos que se asemejan a Vertisoles y suelos isohúmicos (Clasificación francesa).

Sobre depósitos eólicos, los suelos que aparecen están relacionados con la climatosecuencia, bajo condiciones húmedas y en las partes altas Andisoles, a medida que desaparecen las condiciones de humedad desaparecen las características ándicas y se identifica un horizonte cámbico y úmbrico; clasificados como Humitropepts. En áreas bajas, aumenta el lesivaje y aparecen los horizontes argílicos, estos suelos se acercan a los Brunizems (Clasificación francesa).

En condiciones más secas en donde presenta fuerte contraste textural de tipo planosólico, se clasifican como Abruptic Haplustalfs, Durustalfs (Favre y Gaviria, 1992). Estos suelos por lo general poseen porcentajes de saturación altos en cationes alcalino y alcalinoterreos, el magnesio es dominante, y el contenido de materia orgánica es bajo.

G. Distribución.

En Colombia, los estudios sobre suelos han posibilitado el inventario e identificación de áreas con capas endurecidas sobre el territorio. Sin embargo, son pocos los estudios e investigación sobre su origen y dinámica de evolución

En los aportes sobre distribución y origen, Favre y Gaviria, op cit., indican la presencia de estos horizontes, en el Altiplano de Nariño, el cual constituye un Valle Interandino del Plio-Cuaternario, en algunas áreas removidas por los ríos y rellenados por depósitos eólicos estratificados, endurecidos básicamente en las regiones secas.

Este Altiplano geológicamente es llamado "formación Nariño" y el conjunto de depósitos eólicos es la continuación de la formación "Cangahua" desde la República de Ecuador. Vera y López, op cit., reportan la presencia de "Cangahua" desde la zona Andina, norte de Ecuador, hasta Popayán, Colombia, que representan depósitos piroclásticos endurecidos de edad Pleistocénica.

Más al norte del alliplano de Nariño, estas formaciones están localizadas en el fondo y las márgenes de los Valles, siempre ligadas con las condiciones del clima y ubicadas sobre dos tipos de depósitos:

- A partir de tobas fluviovolcánicas y fluviolacustres en la que están: la formación Honda (Mioceno), Mesa (Plio-Pleistoceno) y Zarzal (Plioceno).
- A partir de depósitos eólicos más recientes, frecuentes en las vertientes que bordean los Valles, incluyen depósitos hidrovulcánicos (lahar) en el Valle del río Magdalena. En climas secos y en numerosas Cuencas y Valles y en zonas secas del Alliplano Cundiboyacense y en la Sabana de Bogotá (Malagón *et al.*, op cit).

H. Importancia.

El estudio de la génesis y caracterización de suelos con horizontes capas denominados duripanes, puede relacionarse con diferentes aspectos pedológicos y agronómicos que sustentan su importancia.

Uno de los más importantes es la asociación de estos horizontes con suelos de origen volcánico que representan una superficie de 1.376,000 Km² (Zebrowski, op cit.), equivalente a un 20% aproximadamente, del basamento interandino de América Latina, sumado a esto, en la mayoría de los casos son suelos con bajo potencial agrícola, a menudo ubicados en regiones muy pobladas, que los colocan bajo mayor riesgo de erosión. En Colombia, se considera que estas áreas ocupan entre el 3.5 y 4,5% de la región Andina, equivalente el 1,3% del territorio nacional, equivalente a 15.000 km² aprox. ubicadas en las áreas antes mencionadas Fig. 3 (Faire y Gaviria, op cit)

El estudio de los suelos volcánicos endurecidos constituye un aporte directo en el inventario de áreas con capas endurecidas, como base científica, de referencia para el manejo, rehabilitación desde el punto de vista de la producción agrícola, ya que limitan el desarrollo de las especies, disminuyendo en muchas ocasiones áreas de producción de alimentos. Situación que ha fomentando el abandono de tierras por parte de las campesinos, propiciando cambios en su uso y de esta manera, pauperización de la calidad de vida en la zona.

Estas capas u horizontes cobran importancia, ya que se les ha dado diferentes usos como materiales de construcción, también porque en algunos casos guardan elementos arqueológicos de interés cultural.

En Colombia este trabajo representa un aporte más a las investigaciones de suelos con horizontes endurecidos, ya que alrededor de éstos existen pocos estudios que permitan entender su dinámica natural y, así, hacer un uso y manejo óptimos.



ZONAS CON CAPAS ENDURECIDAS

Figura 3. Localización de Capas Endurecidas en Colombia

III. OBJETIVOS

Objetivo general:

Contribuir al conocimiento de la morfogénesis de suelos con capas endurecidas de origen volcánico en regiones subhúmedas de la región andina en Colombia.

Objetivos específicos:

- * Determinar las características físicas, químicas, mineralógicas y micromorfológicas de los suelos y capas endurecidas.
- * Identificar el tipo de material cementante y los tipos de capas endurecidas.
- * Clasificar taxonómicamente los perfiles en función de las características desarrolladas.
- * Comparar la caracterización de los perfiles estudiados con materiales desarrollados bajo condiciones similares en México.
- * Establecer hipótesis sobre la génesis de las capas cementadas y los suelos asociados.

IV. HIPOTESIS

- * Las capas endurecidas están constituidas por material piroclástico, cuyo compuesto principal es el vidrio volcánico, que mediante alteración geoquímica libera silice para efectuar una acción cementante y propiciar la formación de duripanes.
- * La formación de capas endurecidas limita el desarrollo de los suelos, por lo tanto poseen características de bajo desarrollo.



V. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

1. MEDIO FÍSICO.

A Situación geográfica.

El Altiplano de Nariño es una depresión entre dos cadenas montañosas en los Andes Colombianos a una altura aproximada de 3000 m.s.n.m., como continuación de los Andes Ecuatorianos. Está localizado dentro de la región fisiográfica Andina del Departamento de su mismo nombre, ubicada entre los 76°47' y 77°30' longitud oeste y 1°43' y 0°39' latitud norte y se extiende a lo largo del Departamento, dividido en dos subregiones: Norte y Sur. (Fig. 4)

La zona norte está comprendida por las regiones de Juanambú-Buesaco-Chachagüí y el Valle de Atriz y la zona sur es la propiamente llamada Altiplano de Nariño. La zona de estudio ocupa aprox. 40 Km², ubicada en el área, de la subregión norte, específicamente, en el Municipio de Chachagüí, a una altura de 1750 m.s.n.m. aproximadamente, con zonas relativamente planas y muy pendientes (Fig.5). Esta área se caracteriza por los taludes o cortes verticales de los ríos y quebradas.

B. Geología.

Los estudios geológicos del Departamento de Nariño, resaltan aspectos generales del área de estudio, en el mapa geológico a escala 1:400.000 elaborado por Arango y Ponce, 1980, el municipio de Chachagüí está localizado sobre un grupo de rocas volcánicas del Terciario-Cuaternario, que representan el 20% del área del Departamento, formando una sola unidad estratigráfica que han denominado como "capas lúficas de Nariño" (Grosse 1935, citado por Arango, op cit.) y formación Nariño (Hubach 1957, citado por Arango, op cit.)

En recopilaciones hechas por Grosse; Royo y Gómez; Bueno; citados por Luna, 1973 establecen una estratigrafía general del Departamento, de los materiales aflorados, en estudios



más recientes Murcia y Cepeda, 1991, describen la estratigrafía del área norte del departamento, de manera más detallada, tabla 1:

Tabla 1. Estratigrafía del Departamento de Nariño

Edad	Tipos de materiales	Tipos de materiales
	Fuente: Grosse, Royo y Gómez y Bueno, Citados por Luna, 1973.	Fuente: Murcia y Cepeda, 1991.
Cuaternario - Pleistoceno	<ul style="list-style-type: none"> • Diluviales:- Tobs andesíticas - Aglomeríticas - Cascajos: piedra pómez areniscas túficas <p>Depósitos volcánicos más recientes de</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aluviales: cenizas de materiales tobáceos 	<ul style="list-style-type: none"> • Rocas hipoabisales: andesítica y dacítica • Depósitos volcánicos: Lavas, Flujos de lodo, Piroclastos Rocas sedimentarias-volcánicas • Sedimentos semiconsolidados y no consolidados
Plioceno	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Tobs andesíticas y aglomeríticas Conglomerados (túficas) 	
Terciario	<p>No afloran en la zona de estudio</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Formaciones efusivas paleovolcánicas ◆ Tobs ◆ Formaciones de peridotitas 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Rocas intrusivas ◆ Rocas oceánicas ◆ Rocas metamórficas de muy bajo grado ◆ Rocas metavolcánicas ◆ Un conjunto de gabro de grano fino ◆ Rocas ultramáficas
Cretácico	<p>(rocas preterciarias)</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Fragmentos de dioritas 	<p>Intercalaciones de:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Esquistos verdes
Precambico- Paleozoico	<ul style="list-style-type: none"> • Pizarras arcillosas • Pizarras silíceas • Rocas paleovolcánicas • Rocas metamórficas • Aglomeritas e illitas 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Esquistos negros cuarzo-micáceos ◆ Pizarras ◆ Cuarzitas

La secuencia estratigráfica del Cuaternario-Pleistoceno de la tabla 1, se refiere a materiales asociados a actividad lávico-piroclásticas proveniente de diferentes emisiones de focos volcánicos localizados fuera del área, tales como: Volcán Galeras, Morasurco, Doña Juana,

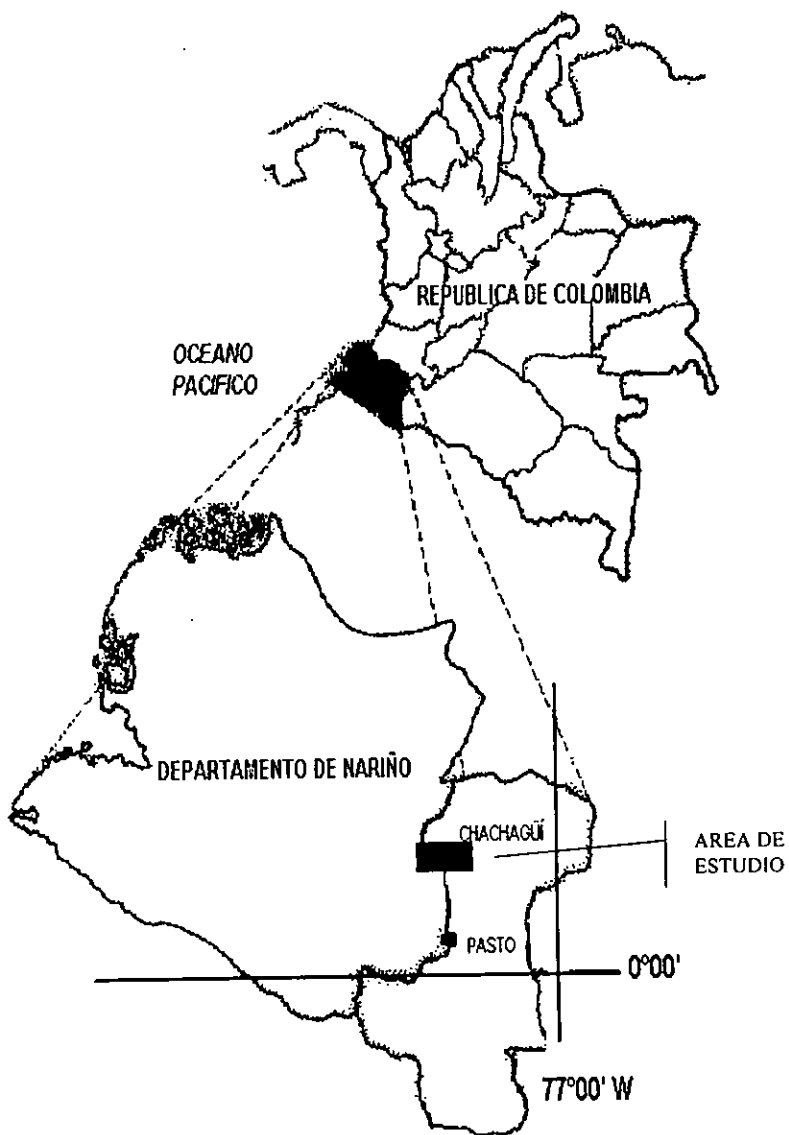


Figura 4 Localización del Departamento de Nariño y área de estudio

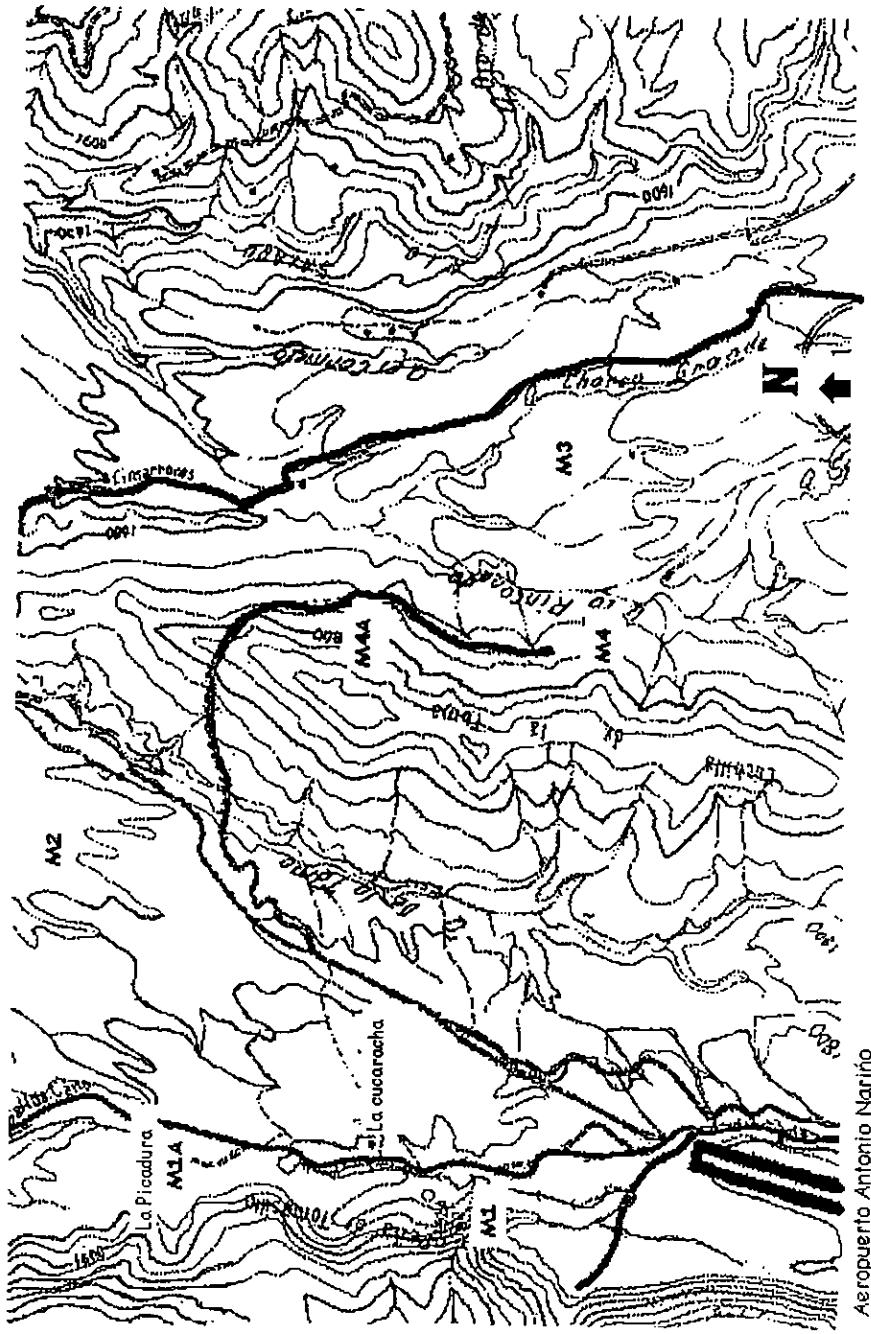


Figura 5. Localización de los perfiles muestreados

Plano cartográfico Escala 1:25.000

Se han diferenciado los siguientes tipos de depósitos: Flujos piroclásticos, avalanchas ardientes y de escombros (TQva), ignimbritas (TQvi), lavas y cenizas (TQvlc), lahares y lavas (TQvll), lluvias de cenizas (Qvc), glaciares y fluvioglaciares (Qsgf), de terrazas (Qt), coluviales (Qc) y depósitos aluviales (Qal), Murcia y Cepeda, op cit.

Estos autores reportan para el sector del aeropuerto Antonio Nariño, Municipio de Chachagüi, la presencia de avalanchas ardientes y escombros, que son rocas compuestas por cantos pequeños de lavas, cantos líticos y pumitas. Los fragmentos líticos están soldados dentro de una matriz de ceniza y vidrio, a veces de color rojizo, dado por la presencia de óxidos de hierro sineruptivo. El aspecto caótico de su morfología es debido al carácter turbulento y violento de los flujos a la hora de los depósitos. Diferentes muestras de éstas cenizas, analizadas, presentan dos asociaciones de minerales; piroxenos con predominio de anfíboles.

Otras informaciones geológicas, que pueden relacionarse con el área de estudio son las realizadas para áreas cubiertas con Canchagua en el Ecuador (Winckell y Zebrowski; Vera y López, 1992), en las cuales admiten que en la mayoría de los casos, la Canchagua proviene de caídas de cenizas de lapilli, así como también de flujos piroclásticos. Sin embargo, se mantiene una uniformidad del paisaje, debido a que la alteración de los materiales antiguos (más de 10.000 años) es muy alta, de tal manera que se asemejan a los materiales provenientes de caídas aéreas o a las tobas mas recientes.

En trabajos de Vera y López (1992) indican una secuencia estratigráfica de la Canchagua al Norte de Ecuador, que se encuentra en discordancia sobre las cenizas volcánicas pliocénicas y en concordancia y debajo de los depósitos recientes de cenizas modernas.

a. Composición de las cenizas volcánicas para la zona de estudio

En Nariño, Luna 1969, citado por Cortés *et al.*, 1986 reporta cenizas tipo dacita-andesita, compuesta principalmente por feldespatos, anfíboles, vidrios y materiales alterados. En estudio más reciente de Andosoles de Colombia, Malagón *et al.*, 1991, obtienen minerales de la fracción



menor de 2 mm, de tipo andesítico, con promedios de: 41,9% de feldspatos, 8,5% anfíboles, 7% piroxeno, 27,3% vidrio riolítico y trazas de micas, hematita, gohetita y fragmentos líticos.

La mineralogía reportada por estos autores, para los suelos asociados a las cenizas volcánicas en la zona es: La fracción arena (50 - 250 μ m) está caracterizada por altos porcentajes en plagioclasas ricas en sodio, anfíboles y cantidades pequeñas de cuarzo y piroxeno, el vidrio también es abundante. En la fracción limo (2 - 50 μ m) se presenta cuarzo, cristobalita, anfíboles y plagioclasa y la fracción arcillosa (< 2 μ m) está representada por la abundancia en alofano, principalmente en las zonas húmedas, y haloisita, imogolita, caolinita, cristobalita, gibsita y micas en zonas de menor humedad

C. Geomorfología.

Sobre la cordillera Andina en este Departamento se extiende de norte a sur una depresión o valle entre la estribación oriental de la cordillera centro oriental. La depresión se originó durante el Cretácico por la colisión de la placa del Pacífico con la placa Suramericana. Geomorfológicamente está dividida en dos áreas: norte y sur.

El área norte, de interés en este estudio, comprende un paisaje erosionado sobre laderas separadas que es el resultado de diferentes procesos de formación, tales como: 1) Una secuencia de hundimientos y sollevamientos ocurridos en los Andes durante el Terciario. 2) Formaciones tectónicas, originando fallas. 3) Variación de rocas, climas y procesos erosivos que caracterizan el área por presentar profundos valles (Patía, Juananbú, Mayo, Güaitará, Pasto, etc.) con desgaste de sus paredes por acción de la gravedad y corrosión (Crickway, 1974; citado por Cortes *et al.*, op cit.) originando formas en V de talud casi rectos y sin cambios de pendiente, que indican diferentes ciclos de erosión, pero más que nada, esto significa un levantamiento actual de la zona. En general el relieve es muy abrupto y escarpado con pendientes complejas.

Los fenómenos geomorfológicos superficiales dominantes en esta área son: movimientos en masa superficiales, especialmente terracetas, deslizamientos, derrumbes y escurrimientos difusos, favorecidos por la posición de las rocas en V aflorantes o por la escasa vegetación.

Los factores geomorfológicos más sobresalientes, para la zona de estudio son: Los cambios bruscos de río Patía, con procesos de hundimiento y levantamiento tectónico, que dieron origen a la formación de la Hoz de Minamá y la actividad del volcán extinguido de Linares, el Complejo volcánico del Peñon, la caldera erosionada de San Lorenzo y grandes altiplanicies, relacionadas con el vulcanismo explosivo, Luna, 1973; Murcia y Cepeda, 1991.

D. Clima

La geomorfología de las cordilleras, altas y abruptas, forman barreras contra los vientos Alisios aislando y generando condiciones climáticas internas dependientes de los fenómenos de circulación local (Föhn) o convección (Faire y Gaviria, 1992). Estas variaciones caracterizan los valles con condiciones secas y contrastes temporales de humedad muy acentuados, con relación a las partes altas de las vertientes al interior del país.

La temperatura es uno de los factores climáticos más o menos constante durante todo el año y depende de la altura, típico de los climas tropicales, como regla general se presentan descensos de 6°C por cada 1000 m de elevación. Las variaciones de las precipitaciones son importantes entre las zonas de vida, mientras que la insolación es mayor en los valles, de tal forma que se presentan cambios en los procesos de evapotranspiración.

Chaves *et al.*, 1959 (citado por Luna *op cit.*) establece la existencia de cuatro pisos térmicos en el área, ellos son: clima Cálido (0 - 1000 m.s.n.m.) temperatura mayor de 24 °C, Templado (1000-2000 m.s.n.m.) temperatura media de 18 °C, Frio (2000 - 3000 m.s.n.m.) temperatura media de 12 °C y Paramuno (mayor de 3.300 m.s.n.m.) temperaturas menores de 10°C.

La zona de estudio está localizada entre 1700 y 2000 m.s.n.m., el relieve se caracteriza por tener tanto áreas planas como escarpadas. Con los datos climatológicos registrados en la estación Aeropuerto Antonio Nariño, entre los años 1984 y 1994 (HIMAT, 1995), se aplicó la metodología de Thornthwaite para establecer un balance hídrico y hacer una aproximación del régimen de humedad del suelo.

Con base en esta metodología, se calculó el Índice hídrico de Thornthwaite (IHT), Índice de Aridez (IA), Índice Pluvial (IP) y concentración térmica. Estos índices fueron calculados, a partir de los datos de precipitación y temperatura. En el cálculo de la evapotranspiración, el índice de calor y el factor de corrección utilizado en la metodología, fue tenido en cuenta de acuerdo a la latitud.

En el gráfico 1 se observan dos períodos de lluvias de una duración promedio de 2 meses, entrecortados por un período seco de 3,5 meses. Los meses más secos son julio - agosto, que coinciden con los meses de mayor temperatura.

El cálculo de los índices hídrico (IHT), de aridez (IA), pluvial (IP) y concentración térmica, determinan un clima ligeramente húmedo y templado frío, que se clasifica como subhúmedo (C), comparado con la clasificación seguida por la dirección de Agrología IGAC, para Colombia, corresponde a un clima medio húmedo (m - H)

En el balance hídrico representado en el climatograma (Fig. 5. 1), se estima un promedio de 280 días/año húmedos, de los cuales 120 presentan exceso de humedad, los otros 85 días restantes, expresan deficiencia de agua y sólo 50 de ellos, presentan sequía absoluta, ya que el suelo permite almacenar humedad en el resto.

De acuerdo con el balance hídrico, los regímenes de temperatura y humedad del suelo, corresponden a isotérmico y údico, respectivamente, ya que el suelo permanece húmedo por más de 90 días acumulativos y con una temperatura entre 15 y 20°C, aproximadamente. Sin embargo, el cálculo teórico, propuesto en la metodología de Thornthwaite para la determinación del movimiento de agua en el suelo, humedad almacenada y deficiencia de humedad, a partir del valor de evapotranspiración, supone que un suelo posee una sección de control capaz de almacenar 100mm de agua. Para los casos de capas endurecidas, duripanes o contacto líticos no se cumple esta condición, ya que, constituyen una limitación física en la sección de almacenamiento y retención de agua. En otras palabras, éstas limitan las condiciones de humedad del suelo y su sección de control es menor, así como también la evapotranspiración puede aumentar. En este caso, la evapotranspiración real es mayor a la calculada, así como lo reporta el HIMAT, por lo tanto,

el número de días secos en la zona aumentan, proporcionando al suelo condiciones de humedad limitada, asociada a un régimen de humedad ústico.

Por otro lado, la presencia de especies vegetales en la zona, tales como *Agave americana* (fique), *Hesperomeles, sp.* (mortiño), y *Opuntia, sp.* (Tuna), corresponden de manera mas real a condiciones ústicas que údicas.

E. Vegetación

La vegetación colombiana contiene una gran variedad de formas biológicas de acuerdo a sus unidades bioclimáticas. De acuerdo a las zonas de vida o formaciones vegetales descritas en el sistema Holdridge (1987) el área de estudio está localizada dentro de la zona andina, colombiana en un piso cálido con vegetación de Bosque seco montano bajo, Bosque húmedo montano bajo, Bosque húmedo montano. Estas regiones abarcan regiones entre 12 y 24°C, precipitación entre 1000 y 2000 mm/año.

El mapa de vegetación natural de Colombia (escala 1:8.000.000) describe en forma general la vegetación correspondiente a la selva subandina, descrita más en detalle por Cuatrecasas (1958), como una zona que ocupa las vertientes más abruptas de las cordilleras, con alturas que van desde los 1.000 hasta los 2.400 m.s.n.m., precipitaciones entre los 4.000 y 1000 mm/año y temperaturas medias anuales entre 23° y 16°C.

Según éste autor, la composición y estructura clímax de la selva subandina a los 2.000 m.s.n.m. es: Árboles, Araliaceae, Bombacaceae, Bromelliaceae, Celastraceae, Compositae, Cunoniaceae, Euphorbiaceae, Icacinaceae, Leguminosae, Melastomataceae, Meliaceae, Moraceae, Myristicaceae, Simaroubaceae, Staphyleaceae, Styracaceae, Symplocaceae y Vochysiaceae; árbolitos: Caprifoliaceae, Clusiaceae, Passifloraceae y Verbenaceae; Arbustos, Acanthaceae, Melastomataceae, Polygalaceae y Theophrastaceae; Palmas especies de Euterpe; Epifitas leñosas, araliaceae; Bejucos, Acanthaceae, Compositae, Hydrangeaceae, Passifloraceae, Rubiaceae, Sapindaceae y Vitaceae. De esta vegetación es muy poca la que hoy se encuentra, la

mayoría ha sido arrasada por la acción antropogénica, sólo se encuentran, en las zonas altas de la montaña.

La vegetación hoy encontrada en la zona, se reduce a vegetación introducida para uso agrícola, como son las gramíneas (Kikuyo y Labrantus) utilizadas para el pastoreo, *Agave americana* (fique) para uso en la industria de cabuya al igual que *Zea maíz*, Musáceas y frutales (cítricos) como agricultura de subsistencia, también vegetación de matorral como, *Hesperomeles, sp.* (Mortiño), *Opuntia, sp.* (Tuna).

Tabla 2. Análisis del Clima
ESTACION METEOROLOGICA AEROPUERTO ANTONIO NARIÑO
MUNICIPIO DE CHACHAGÜI - NARIÑO

LATITUD 01°26' N

LONGITUD 77°16' W

ELEVACION 1796 m.s.n.m.

MESES	Enero	Febrer.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agos.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom. mes año
Temperatura med. (Te) ° C	18.70	18.90	19.20	19.20	19.40	20.00	20.00	20.30	20.00	18.90	18.50	18.60	+19.46
Precipitación med (Pe) cm	10.20	8.30	12.90	13.30	11.70	4.30	3.80	1.90	6.70	14.00	14.00	10.80	+ 9.33
Evaporación med. cm *	10.20	9.20	10.90	10.50	11.70	12.20	14.80	13.60	14.50	12.10	8.90	9.60	+11.52
Índice de Calor med. (ICM) %	7.37	7.49	7.67	7.67	7.79	8.16	8.16	8.34	8.16	7.49	7.25	7.31	+ 92.84 ICM
Evapo. Potén mensual (Ev) cm	6.64	6.78	7.00	7.00	7.15	7.61	7.61	7.84	7.61	6.78	6.49	6.57	
Factor de Corrección FC cm	1.04	0.94	1.04	1.01	1.01	1.01	1.04	1.01	1.01	1.04	1.01	1.04	
Evap. Potén. Correg. mes. (EP) cm	6.90	6.38	5.62	7.07	7.22	7.68	7.91	7.92	7.68	7.05	6.56	6.83	84.83
Mov. de agua en suelo (MHS) cm	0.00	0.00	7.28	2.72	0.00	-3.38	-4.11	2.51	0.00	6.95	3.05	0.00	
Humedad almacenada (HA) cm	0.00	0.00	7.28	10.00	10.00	6.62	2.51	0.00	0.00	6.95	10.00	10.00	
Exceso de Agua (DA) cm	0.00	0.00	0.00	3.51	4.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.39	3.97	16.35 DA
Deficiencia de Agua (DE)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.11	3.51	0.00	0.00	0.00	0.00	7.63 DE
Evaporación Real (ER) ** cm	6.90	6.38	5.62	7.07	7.22	7.68	3.80	4.41	7.68	7.05	6.56	6.83	
Relación Pluvial (RP)	0.48	0.30	1.30	0.88	0.62	-0.44	-0.52	-0.76	-0.13	0.98	1.13	0.58	
Índice de Aridez en % (IA)	8.999												
Índice Pluvial en % (IP)	13.87												
Índice de Humedad en % (IH)	19.27												
Concentración Térmica (CT)	50.57												

FORMULA DE CLIMA

PF: LIGERAMENTE HUMEDO

SA: PEQUEÑA DEMASIA DE AGUA

TD: TEMPLADO FRIO

VC: CONCENTRACION MEDIA DE CALOR

Evap. Potencial mensual*: valores reportados por el HIMAT

1995

*. Correg. mes **: Valores calculados por la metodología de THORNTHWAITTE

DA: exceso de agua total año

DE: Deficiencia de agua total año

*: valor utilizado en el cálculo de ER

CLIMATOGRAMA
Determinación del Balance de Agua (THORNTHWAITTE, 1942)
Estación Aeropuerto AntonioNariño

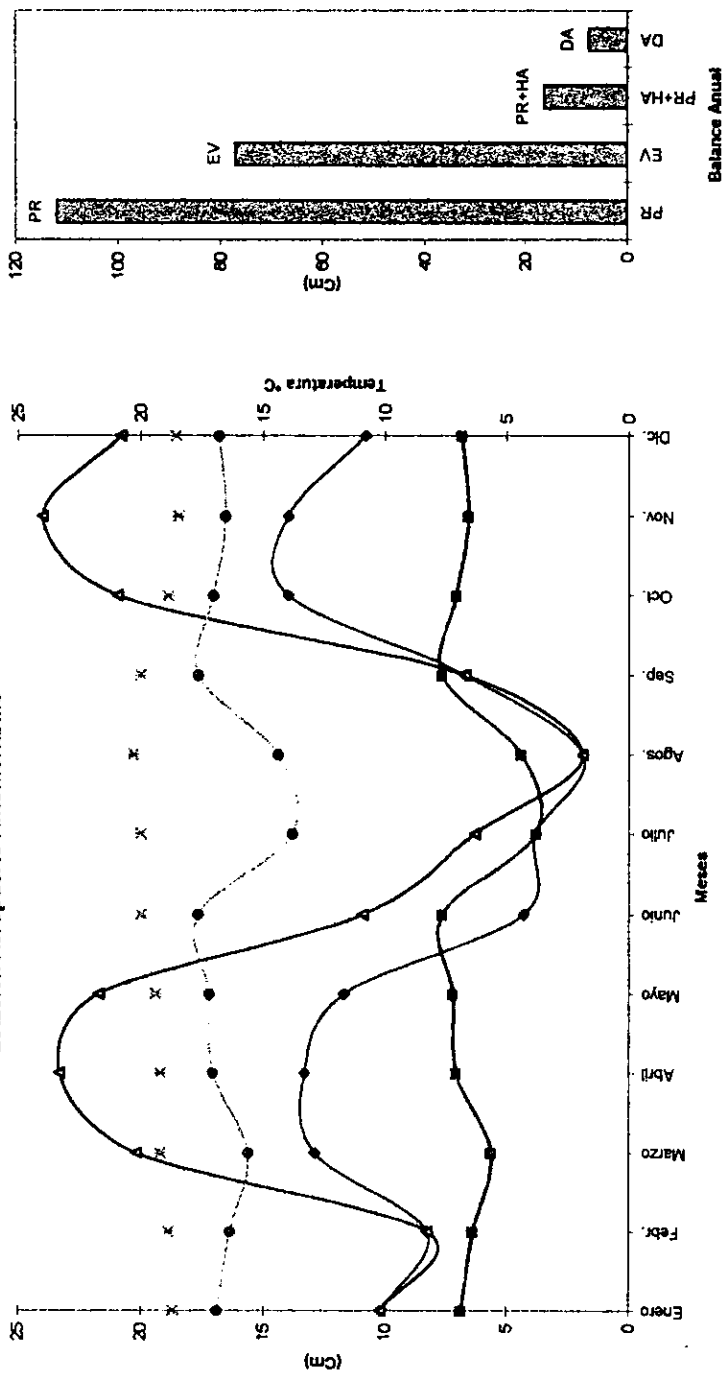


Figura 6. Análisis del Clima en la zona

VI. METODOLOGIA

1. Fases metodológicas

La metodología del presente estudio constó de 4 etapas que a continuación se describen:

A. Fase de gabinete

a- Recopilación de información bibliográfica

Se recopiló información sobre diferentes aspectos del tema de estudio; climatología, geología, suelos del área, cartografía y fotos aéreas pancromáticas blanco y negro a escala 1:17.000, posteriormente se llevó a cabo su revisión y análisis.

b- Selección del sitio de muestreo

Con base en levantamientos de suelos preliminares (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1973) y clasificación de suelos de Colombia y fotointerpretación de las fotografías aéreas de la zona, se ubicó un sector al nororiente del Aeropuerto Antonio Nariño perteneciente a una terraza fluviovolcánica denominada "Asociación Aeropuerto", con pendientes que varían entre 5 y 15 %, donde se localizan capas endurecidas, que expresan altos niveles de erosión. A su vez se diferencian pequeñas unidades que aparentan una subdivisión, posiblemente por procesos tectónicos.

Teniendo como base la información aerofotográfica, se seleccionaron los sitios de estudio. Los puntos de muestreo se ubicaron dentro de un área de 40 ha, en las fotografías se demarcaron áreas que se diferenciaban por características tales como: geomorfología y exposición de capas endurecidas. Dichas áreas se llamaron unidades terrestres (UT). En cada UT se ubicó un punto de muestreo, en las unidades 1 y 4 se tomaron dos puntos.

B. Fase de Campo

a- Reconocimiento de la zona

Ubicada el área, se realizó un recorrido para localizar los puntos de muestreo preestablecidos. Describiendo características agronómicas y topográficas de los sitios.

b- Descripción de los perfiles

La descripción de los perfiles se llevó a cabo a una profundidad de 1.5 m con base en el Soil Survey Staff (1994), en la cual se tienen en cuenta para cada uno de sus horizontes seis parámetros: espesor, color, textura, estructura, consistencia en seco, húmedo y mojado, presencia de raíces y límites entre horizontes.

c- Muestreo

Se recolectaron muestras de aproximadamente 1 Kg de suelo, por horizontes observados y diferenciados por color, consistencia y textura. En el caso de las capas endurecidas se tomaron muestras en bloques de 10 cm de ancho en sus lados. Las muestras fueron guardadas en bolsas de polietileno, etiquetadas y selladas. Se hizo un muestreo seis perfiles, con un total de 16 muestras.

C. Fase de laboratorio

Una vez transportadas las muestras al laboratorio se secaron al aire durante 3 días. La mitad de la muestra se utilizó para adelantar pruebas físicas y micromorfológicas en muestras indisturbadas y la otra mitad se molió y tamizó a través de una malla de 2 mm, para practicar las siguientes determinaciones:

a- Físicas

- * Color en seco y en húmedo por comparación con tablas Munsell (Munsell Soil Color Chart, 1975)
- * Densidad real, método del picnómetro (A.S.T.M., 1958)
- * Densidad aparente: método de la parafina (Blake, 1965), en muestra inalterada.

- * Densidad aparente: método de la probeta (baver, 1956)
- * Determinación de porosidad total a partir de la densidad aparente y real
- * Textura por el método de la pipeta (Day, 1965)
- * Determinación de la resistencia a compresión simple, utilizando núcleos labrados de muestras inalteradas, sujetos a esfuerzo constante en un marco de carga de acuerdo a Head, 1984.

b.- Químicas

- * pH en una solución acuosa en relación 1:2,5 y en KCL en relación 1:2,5, con un potenciómetro marca Metrohm Herisao, modelo E588
- * Materia orgánica por el método de Walkley y Black modificado por Walkley (1947).
- * Capacidad de intercambio catiónico total (C.I.C. T.) por el método de percolación con acetato de amonio 1 N a pH 7 (Peech, 1947).
- * Determinación de bases intercambiables por determinación en el extracto obtenido por percolación con acetato de amonio 1 N a pH 7.
- * Calcio y magnesio extraídos por percolación con acetato de amonio y determinados por titulación con EDTA a 0.02 N (Jackson, 1964).
- * Sodio y potasio extraídos por percolación y determinados por flamometría con un flamómetro marca Coming modelo 400 (Jackson, 1964).
- * Fósforo aprovechable, cuantificado por el método colorimétrico (longitud de onda 640) utilizando una solución extractora de fluoruro de amonio (Bray y Kurtz, 1945).
- * Determinación de óxidos libres de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 por el método de Hashimoto y Jackson (1960).
- * Determinación de óxidos totales, por el método de fusión con metaborato de litio en una disolución de ácido nítrico; método propuesto por Verbeek *et al.*, 1982.
- * Determinación de Si, Al y Fe libre, por el método de: Ditionito-citrato-bicarbonato, (Mehra y Jackson, citado por Wilson, 1994),
- * Determinación de Si, Al y Fe estructural mediante el método de Oxalato de amonio (Smith, citado por Wilson, 1994)

- * Determinación de Si, Al y Fe quelatado con materia orgánica mediante el método de Pirofosfato de sodio (McKeague, citado por Wilson, 1994).
- * Estimación de porcentaje de alofanas más imogolita mediante el método propuesto por Parfitt y Henmi, 1982.

c. Estabilidad de los horizontes endurecidos

Utilizando una pequeña muestra inalterada de las capas endurecidas se sometieron a tratamientos con agua destilada pH 7, HCl 1N y KOH concentrado, este último tratamiento realizado en forma alternada, tomando el tiempo de colapso, de acuerdo a lo propuesto por la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1994) para horizontes endurecidos.

d.- Mineralógicas

- * Determinación mineralógica, mediante difracción de rayos X, utilizando un generador Philips PW 1130/96 con radiación de cobre K α , monocromador de grafito, filtro de vanadio y condiciones de excitación de 30 KV-20mA.
- * El micro-análisis de cementantes, en muestras preparadas sobre láminas delgadas pulidas y cubiertas con una capa de oro ionizado, observadas en un microscopio electrónico de barrido, JEOL, JSM-35.

e. Micromorfológicas

- * El análisis químico de los cementantes fue efectuado en un equipo de energía dispersa de rayos X, marca Tracor, unido al microscopio electrónico de barrido.
- * El estudio petrográfico de laminas delgadas fue efectuado bajo el microscopio con aumento de 10X y 40X, con los criterios propuestos por el Handbook de micromorfología, los cuales permiten describir los micro-constituyentes del suelo; la fábrica; plasma, poros y rasgos pedológicos, además la naturaleza mineralógica del material.

f.- Morfológicas

- * Descripción morfológica de arenas y limos; redondez y esfericidad, mediante tablas de comparación, (Powers, 1953).

.- Clasificación taxonómica de los perfiles

Las claves de clasificación taxonómica empleadas fueron FAO- UNESCO, 1994 y Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1994).

h.- Análisis de resultados

Se llevaron cabo dos tipos de análisis cuantitativos, a partir de los resultados obtenidos en las características morfológicas y en los óxidos totales, ellos fueron:

- * Determinación del desarrollo relativo de los horizontes y el desarrollo relativo del perfil, mediante la metodología propuesta por Handen y Taylor, citados por Birkeland, *et al.*, 1990.
- * Análisis de pérdidas y/o ganancias de óxidos totales entre la roca basal y los horizontes intemperizados, a partir de la constante de aluminio (Krauskopf, 1979). La determinación de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 libres se realizó de acuerdo con Hashimoto y Jackson, 1960.

VII. RESULTADOS Y DISCUSION

1. Caracterización ecológica de la zona de muestreo

Como se ha referido desde el inicio, el área de estudio corresponde a la parte norte del Altiplano de Nariño, sistema terrestre que pertenece a la formación geológica denominada "formación Nariño" (Hubach, op cit.) que abarca gran parte del departamento de su mismo nombre, resultado de diferentes hundimientos y levantamientos con aportes de depósitos volcánicos, caracterizado por sus formas onduladas con incisión de valles profundos y cañones.

El área muestreada, presenta un paisaje de pequeñas mesetas disectadas y montañas, llamadas terrazas fluvio- volcánicas, porque son superficies formadas por acumulación y labrado de materiales volcánicos (tobas y lavas), separadas por cañones profundos y cárcavas como expresión de procesos de erosión morfogenéticos, como son disección y remoción de materiales por agua y transporte por viento, también por erosión antrópica, causada por el mal uso del suelo.

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi en Colombia, ha delimitado esta unidad como Asociación Aeropuerto (AT), Conjunto Aeropuerto. Sin embargo, en la fotointerpretación se observaron pequeñas unidades diferenciadas por su espectro de luz ubicadas sobre mesetas (Fig. 7), que para este estudio, fueron denominadas unidades terrestres (UT), descritas en la tabla 3.

El material parental muestreado en campo e identificado mediante análisis de la composición mineralógica elemental, con base al contenido de óxidos de sílice, corresponde a cenizas volcánicas de composición riolítica, andesítica y dacítica, localizadas a poca profundidad de la superficie y que se prolongan hasta más de los dos metros de la superficie. En los cortes de

la carretera puede verse estos materiales a grandes profundidades, en la mayoría de ocasiones fuertemente erosionados.

La altura del área de muestreo varía entre los 1.600 y 1.800 m.s.n.m. situados bajo condiciones climáticas similares, clima subhúmedo con régimen de humedad ústico y de temperatura isomésico y con vegetación muy escasa, principalmente pastizales y cultivos de subsistencia. El uso del suelo es muy semejante, ya que extensión es pequeña.

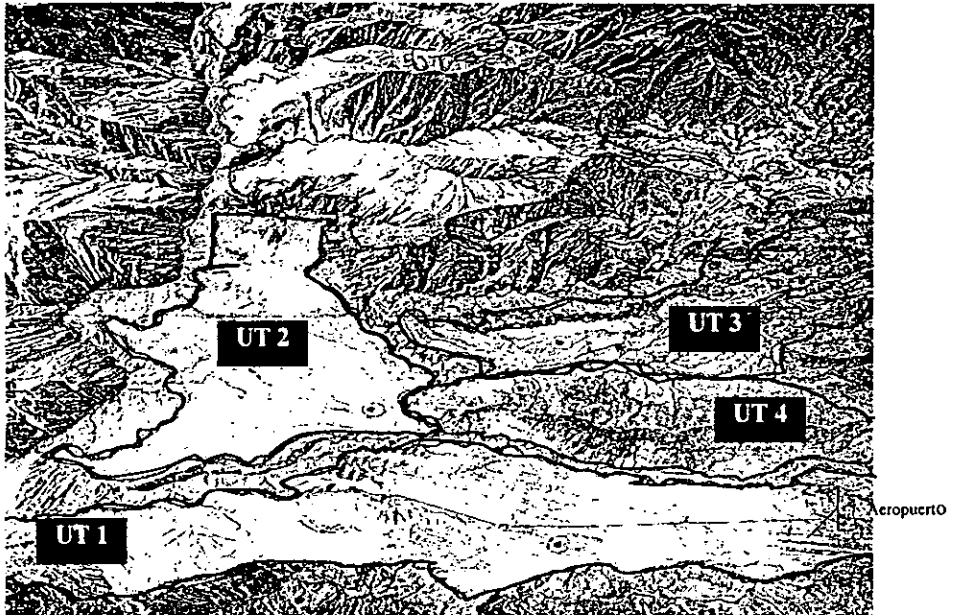


Figura 7. Fotografía aérea de la zona de estudio, sector aledaño al aeropuerto Antonio Nariño, Municipio de Chachagüí. UT1, UT2, UT3 y UT4, corresponden a las unidades terrestres, en donde se muestrearon los perfiles.

En cada UT se localizó un perfil, de manera que, su diferenciación está en relación, a la posición en la geoforma de cada perfil, es decir a la variación en la topografía, también a las características del material parental. Los perfiles se encuentran localizados en la parte alta de las mesetas y en la parte media, con alternancia de los depósitos geológicos, es decir, son el resultado de la alteración de cenizas con variación en la composición química, bajo condiciones de clima semejantes, posición topográfica diferente, en tiempos geológicos similares.

SISTEMA TERRESTRE Altiplano de Narño

Tabla 2. - Elementos Ambientales del Área de Estudio

Unidad	Ambiente Morfogénético	Perfiles Estudiados	Litología	Clima**	Uso del Suelo	Cobertura Vegetal %	Drenaje Externo	Altitud (m.s.n.m.)	Pendiente Grado %	Patrón de Erosión
UT1	Meseta disectada*	M1 Ladera	Cenizas dacíticas	C	Pz	20	Paralelo superficial	1760	5	Cárcavas Erosión fluvial y Antrópica
		M1A Lomerío								
UT2	Meseta disectada*	M2 Ladera tendida	Cenizas riolíticas y dacíticas	C	Pz - Mi	65	Paralelo superficial	1650	8	Erosión fluvial en dirección norte
UT3	Meseta disectada*	M3 Ladera	Cenizas dacíticas	C	Cs - Pz	90	Paralelo	1650	7	Erosión fluvial
		M4 Falda								
UT4	Ladera Media	M4 Falda	Cenizas dacíticas y andesíticas	C	Cs	95	en V	1770	10	Erosión superficial
		M4A Cima								

Uso de suelos: Pz ; Pastizales, Mi ; Matorral, Cs ; Cultivo de subsistencia **Clima: C: Subhúmedo, Thornthwaite

* Estas mesetas se denominan también mesetas de erosión



2. Caracterización de los perfiles estudiados

A. PERFIL M1

Clasificación propuesta

Soil Taxonomy, 1994: Intergrado Lithic Ustorthent-Typic Ustocrept

FAO- UNESCO, 1990: Leptosol Eutrico

Elevación: 1760 m.s.n.m

Geomorfología: Ladera

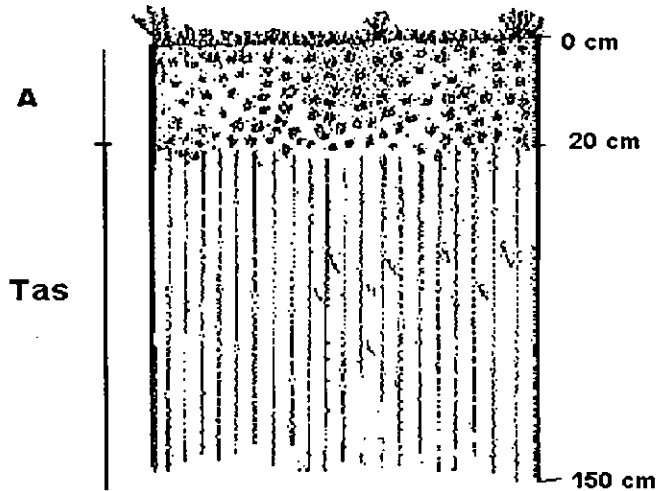


Figura 8. Esquema del perfil M1

Es un perfil constituido por un horizonte y una capa endurecida, (Fig. 8). En la superficie un horizonte A ócrico, caracterizado por su color gris pardo claro y una capa endurecida subsuperficial localizada desde los primeros 20 cm hasta más de 150 cm de profundidad, separada en forma horizontal y clara, denominado toba alterada y silicificada TAs.

El horizonte superficial desarrollado posee estructura de bloques subangulares finos, de consistencia, friable, ligeramente adhesivo y plástico, producto de la transformación fisico-química del material masivo y duro que le subyace, el cual es de color claro, consistencia friable, no adhesiva y no plástica (tabla 4a). La evolución morfológica de este perfil en campo muestra el desarrollo de un horizonte de suelo a partir de la alteración de un material consolidado asociado a una toba.

Los principales mecanismos de alteración expresados en este perfil son, el intemperismo físico y edafológico dado por la acción mecánica de los organismos y el aporte de materia orgánica, que producen cambios en el color y la estructura del horizonte superficial.

La textura del horizonte A es franco arcillo arenosa, con predominio de arenas finas y medias de forma angular, característica muy similar al horizonte subyacente (tabla 4b), lo cual indica, que el material que compone al suelo posee características gruesas, resistente a la abrasión y transformación. Las formas subangulares prevaletientes están ligadas a ambientes de depositación aérea y poco transporte de las partículas, debido a la consolidación del material, que promueve su alteración *in situ*.

En la tabla 4b, se reportan los valores de densidad real, aparente y porosidad, que expresan en el horizonte superficial una reorganización de las partículas por efecto del intemperismo bioquímico por acción de la materia orgánica. Por otro lado, en la capa superficial la densidad aparente es mayor y la porosidad menor, ya que el material original está consolidado, además a éste se suman los productos de alteración edafológica, como arcillas que son iluviadas del horizonte superior.

El pH de los horizontes en este perfil, es ligeramente ácido ya que las condiciones climáticas mantienen un relativo equilibrio con el hidrógeno ionizable, en la superficie este valor posee una ligera disminución, debido a que los iones OH^- de la materia orgánica contenida, intervienen en esta relación. La acidez intercambiable medida, refleja baja interferencia o actividad de iones Al^+ y H^+ intercambiable, en los procesos de alteración (tabla 4c).

Los horizontes presentan bajo contenido de materia orgánica, especialmente el horizonte subyacente, que está limitado a la penetración de raíces y permanencia de biota, ya que posee baja porosidad por estar consolidado y cementado.

La tabla 4c. muestra la capacidad de intercambio catiónico, bases intercambiables y saturación de bases; la primera propiedad está asociada a al contenido de arcilla y a valores de CICT del grupo caolínico. La capa subyacente posee un valor superior en la CICT, lo cual no coincide con la variación en el porcentaje de arcilla y el contenido de materia orgánica, una de las posibles razones es la formación de agregados por parte de arcillas alofánicas, que son difíciles de destruir con los métodos comunmente utilizados en la determinación de textura, lo cual proporciona valores inferiores de esta fracción.

El porcentaje de saturación de bases representa mas del 50%, que caracteriza este suelo como Eutrico y está dominado por la presencia de bases como Mg^{++} y Ca^{++} , estos elementos se encuentran en la solución del suelo producto de la alteración de minerales que los contienen a través de procesos de alteración geoquímica como hidrólisis de silicatos, alúminos y piroxenos. A pesar, que el Ca^{++} es más soluble a pH entre 6 y 7, el Mg se encuentra en mayor proporción, debido a una mayor concentración de minerales primarios que en su estructura poseen este elemento.

La disponibilidad de fósforo en forma asimilable es muy baja, situación muy marcada en el horizonte subsuperficial, este es un fenómeno común en los suelos de origen volcánico, ya que el material parental aporta poco fósforo, además, muchos de los minerales posee grupos radicales activos que lo atrapan y lo dejan poco disponible para las plantas.

La mayoría del fósforo aprovechable es aportado al suelo por procesos de biociclaje, por acción de la biota y la vegetación, por esto esta mas limitado en los horizontes subsuperficiales. Por

otro lado, los suelos jóvenes aportan bajo contenido de fósforo por los incipientes mecanismo de alteración pedoquímica.

La juventud de las materiales y las condiciones ambientales, propician principalmente la alteración de los feldspatos, mediante mecanismos de hidrólisis e hidratación, que concentra en el suelo minerales de Ca^{++} y Mg^{++} , éstos presentan relaciones antagónicas y sinérgicas entre ellos. Al establecer las correlaciones de Ca/Mg , Ca+Mg/K expresan horizontes limitados para el uso agrícola, por la interferencia del calcio por el magnesio y a la vez la disminución del fósforo asimilable. La relación del valor de pKl , presenta materiales ricos en potasio, debido a la presencia de silicatos laminares del grupo de las micas.

El análisis químico de la composición elemental en el suelo total, representado en los óxidos totales, evidencia la presencia de cenizas de composición dacítica (tabla 5). En términos cuantitativos, el horizonte A posee mayor contenido de sílice, con relación a la capa endurecida, a través de ganancias de este elemento, así como también manganeso, calcio, sodio, potasio, fósforo y titanio

Estas ganancias están relacionadas con adiciones de cenizas, que son depositadas, ya sea por vía eólica, de focos aledaños ó por acarreo de material por escurrimiento superficial, que le imprime al horizonte, características geoquímicas de rejuvenecimiento. Colateralmente se identifican pérdidas, poco significativas de hierro y magnesio, que corresponden a la lixiviación de los productos de alteración de minerales como micas, piroxenos y anfíboles,

Las relaciones molares que indican los niveles de alteración de los materiales como: Si/Al , Si/Fe , Si/R_2 son altas, y además son mayores en el horizonte A. Los valores altos, representan el bajo nivel de alteración de los minerales promotores de la formación de suelo, por otro lado, estos valores, en el horizonte superficial, reafirman las condiciones de rejuvenecimiento del perfil.

Este comportamiento a lo largo del perfil, representa en forma general, bajo desarrollo, limitado por la presencia de la capa endurecida, así como también, condiciones locales, de ciclos de rejuvenecimiento, cortos, los cuales no permiten la evolución y diferenciación de horizonte superficial, por el contrario, se presenta como una mezcla homogénea de depósito geológicos.

Contrariamente al comportamiento natural de los óxidos libres de sílice, los cuales tienden a perderse por procesos de lixiviación, precipitación y desilificación, en este perfil prevalecen, con relación a los óxidos de Fe y Al (tabla 5), seguramente esto tiene que ver con las altas concentraciones de este elemento en solución, ya que existe abundancia de vidrio volcánico y otros minerales silicatados, que mediante procesos de alteración liberan sílice. La relación de alteración en éstos tipos de óxidos, es mayor a 2, relacionados con minerales secundarios con estructuras químicas poco cristalinas como sílice amorfa, que corresponden a una de las fases intermedias de alteración edafológica de las cenizas.

La misma tabla presenta la composición mineralógica cristalina y no cristalina, en la que presenta arcillas haloisita 10Å, feldspatos, cuarzo e interestratificados, detectados mediante el análisis de difracción de rayos X. La haloisita 10Å es un mineral que se origina frecuentemente a partir de la alteración de las cenizas volcánicas por procesos de deshidratación del vidrio volcánico (Parfitt, 1984). Este proceso es considerado un proceso débil de transformación, ya que las condiciones alternantes de sequía-húmeda y pH, propician acumulación de sílice y bases, favoreciendo la silicificación y formación de arcillas haloisíticas. De ahí que, la presencia de alofano, imogolita y ferrihidrita, es muy baja. Por otro lado, el alofano e imogolita, son minerales inestables que se mantienen por largo tiempo, sólo bajo condiciones húmedas y acumulación de materia orgánica.

Además, de las condiciones de alteración del medio, como son la humedad, temperatura y pH, la naturaleza del vidrio volcánico, es otro factor que incide en la presencia y evolución los minerales amorfos. Shoji et al., 1993, afirman que el alofano e imogolita se encuentran en suelos

formados de cenizas volcánicas que contienen vidrio de color opaco o amarillento el cual puede intemperizarse mas rápidamente que el vidrio incoloro, aunado a la presencia de bases y las condiciones de pH. En observaciones petrográficas, y mediante tabla de referencia propuesta por los anteriores autores, en la cual asocian la naturaleza del vidrio con el contenido de sílice total, se determina que el vidrio de los materiales estudiados, corresponden a vidrio incoloro de naturaleza ríolítica, los cuales son más resistentes a la alteración. También y aunque, en las observaciones petrográficas se observa abundancia de vidrio volcánico, este perfil no reúne los requisitos, como son contenido de aluminio e hierro amorfo y densidad aparente, que corresponden a criterios necesarios para ser considerados del orden Andisol.

En la descripción micromorfológica de las laminas delgadas, fue identificada una textura arcillo limosa, embebida en una matriz fina; "fábrica" compuesta por una estructura masiva, en la cual no se identifican pedos y microestructura igualmente masiva, sin embargo, se observan poros tipo cámara y fisura, de tamaño muy fino y fuertemente cementados.

La distribución (c/f) es porfirica abierta, es decir, que no existe una selección entre los granos gruesos, con relación a los finos y poca orientación de éstos, lo cual indica que los procesos de depositación fueron vía aérea y la consolidación del material está originada por el relleno de los espacios entre los clastos, por una matriz muy fina de ceniza, formando una estructura compacta y masiva. Sobre este material se han llevado a cabo procesos biológicos, que han permitido la formación de poros.

Los rasgos pedológicos observados en el material, corresponden a ligeros revestimiento de arcilla y sílice sobre los granos. Estos rasgos son evidencia importante en los procesos alteración *in situ* del vidrio volcánico, formando minerales filosilicatos, los cuales aportan en forma secundaria la cementación de los granos, Fig. 9a y 9b. Frecuentemente, se identifican anfíboles y piroxenos alterados, liberando óxidos de hierro que dejan manchas oscuras sobre las láminas, al igual que minerales ferromagnesianos alterados, que justifican la abundancia de Mg^{++} en el complejo de

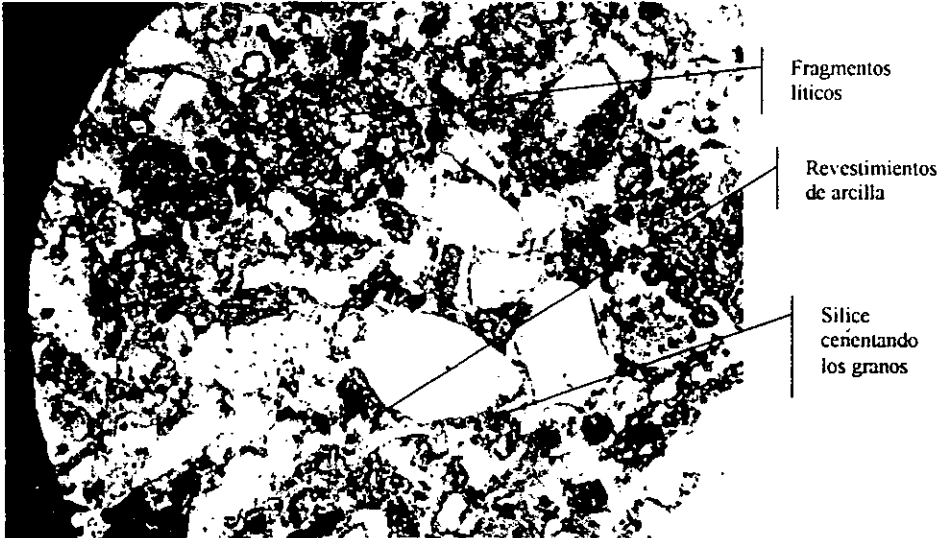


Figura 9a. Distribución porfirica cerrada, con recubrimientos de arcillas y sílice sobre los granos gruesos. Presencia de fragmentos líticos. Luz plana 10X.

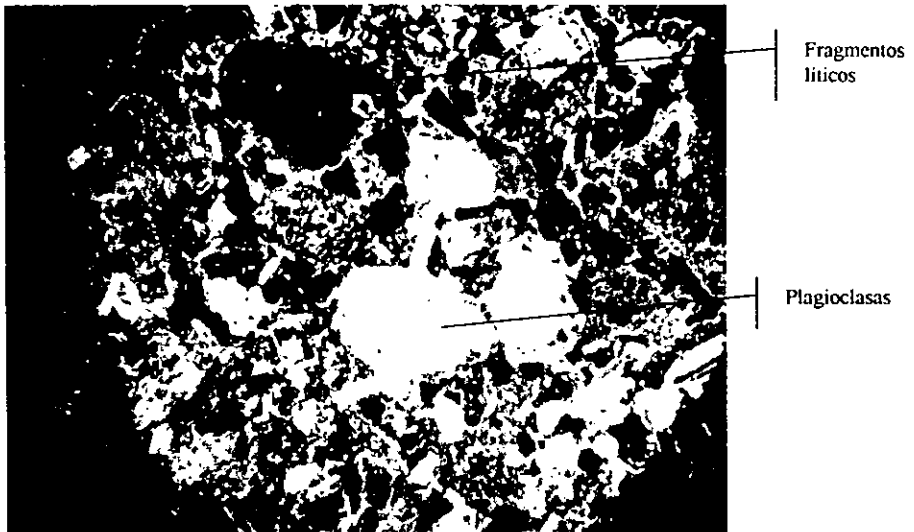


Figura 9b. Presencia de plagioclasas, fragmentos líticos, vidrio volcánico y algunos minerales ferromagnesianos. Nícoles cruzados. 10X

cambio, así como también los óxidos de hierro libre. Estos rasgos de alteración de minerales, expresan condiciones de oxido-reducción, asociadas al régimen de humedad del perfil.

Desde el punto de vista mineral, en la lámina se observa abundancia de vidrio volcánico incoloro, en ocasiones fuertemente alterado, feldespatos, micas, ferromagnesianos, hematita y minerales opacos (Fig. 9b.)

En la mineralogía es importante resaltar la predominancia de minerales poco resistentes a la alteración físico-química, como feldespatos y vidrio volcánico, los cuales controlan y reflejan algunas de las propiedades químicas expresadas en el perfil, el contenido de bases y CICT. Por otro lado, el color pardo que se expresa en los horizontes, seguramente está referido a los estados de transformación y alteración del vidrio volcánico, además, de la presencia de los productos de alteración de los minerales ferromagnesianos y el contenido de materia orgánica.

Desde el punto de vista de clasificación, las expresiones morfológicas más sobresalientes, colocan el perfil dentro del orden Entisol, ya que no existe en primera instancia, la presencia de un horizonte de alteración y acumulación. Sin embargo, las observaciones micromorfológicas, demuestran la formación de un horizonte de alteración en la base de horizonte A, con presencia de acumulación de arcilla y neoformación de ésta, así como también, alteración de varios minerales, de ahí que, posee también algunas características de un suelo del orden Inceptisol. Esta posición taxonómica, aparentemente es ambigua y la clasificación de suelos americana, aún no contempla abiertamente éstos criterios, pero la clasificación FAO-UNESCO ya ha considerado éste estado intermedio, ubicando éstos suelos dentro del criterio de intergrados. De ahí, que taxonómicamente este perfil sea denominado un intergrado Entisol-Inceptisol.

En síntesis, la formación de este perfil, esta dada a partir de depósitos de ceniza, las cuales fueron consolidadas mediante procesos diagenéticos rápidos, generados por los cambios climáticos globales que se dieron en los últimos 10.000 años (Van der Hammer, 1973), permitiendo la formación de una toba. Este material, de carácter dacítico, ha tenido transformaciones; físicas, químicas y biológicas, en la superficie, propiciando la formación de un horizonte A somero. Además

de los cambios edafológicos en la superficie, se identifican condiciones de rejuvenecimiento del perfil, mediante nuevos aportes de cenizas.

Las características morfogenéticas, evidencian procesos iniciales de transformación edáfica del material como son: hidrólisis del vidrio volcánico y minerales silicatados; eluviación e iluviación de arcillas y óxidos de hierro y procesos biogenéticos de pedoturbación. Al interior de la capa endurecida, se observa principalmente, rasgos pedológicos de cementación secundaria, originada por la eluviación e iluviación de arcillas y precipitación de sílice amorfa, que le impregnan y magnifican las características duras.



Tabla 4a. Caracterización del Perfil M1

Horizonte	Profundidad	COLOR				MORFOLOGIA				Observaciones
		Húmedo	Seco	Estructura	Consistencia	Textura	Separación			
A	cm 0-20	Húmedo 10YR 3/2	Seco 10YR6/2	bsa - f - mo	Húmedo fr	Seco D	Mojado La/Lp	Cr/A	Clara, plana	Raíces finas y medias abundantes
TA ₃	20-150	Pardo grisáceo muy oscuro 2.5YR 5/4	Gris pardo claro 5Y 8/2	m	fr	d	na/np	Cr/A		
		Pardo rojizo	Bianco							

Tabla 4b. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Hz.	Prof.	Densidad Mg/m ³	Pors. %	Clase Textural fracción menor de 2mm			Redondez y Esterilidad												
				Arena (%) mm	Limo (%) mm	Arcilla	Limos medios (%)												
	cm	Apar	Real	%	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.10	0.10-0.05	0.05-0.02	0.005-0.002	A	B	C	Ds	E	Ds		
A	0-20	1.19	2.17	55.09	0.45	1.05	15.24	25.59	6.18	7.50	14.12	3.40	22.82	21.0	40.1	23.0	14.4	49.9	42.7
TA ₃	20-150	1.39	2.39	47.55	0.01	5.40	11.91	18.60	15.37	6.03	15.24	2.32	25.06	59.9	30.8	9	26.6	53.3	21.0

Tabla 4c. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Prof.	pH	M.O	C.I.C.T	Bases Intercambiables	cmol/Kg	Σ Bases	Sat. Bases aprov.	P. Relaciones									
								Ca	Mg	(Ca+Mg)/K							
	1:2.5			%	cmol/Kg	cmol/Kg	%	ppm	Ca/Mg	K/Ca	PKI						
A	0-20	6.65	5.40	1.25	2.11	12.50	0.08	0.44	4.00	6.00	10.52	84.12	1.53	17.79	0.67	0.11	0.03
TA ₃	20-150	7.35	5.90	1.45	0.00	23.00	0.20	0.33	5.00	6.00	11.53	50.13	0.87	23.02	0.83	0.07	0.01

bsa: Bloques subangulares

m: Masiva

f: Firme

fr: Friable

d: débil

D: Duro

Lp: Ligeramente plástico

Ls: Ligeramente adhesivo

Cr/A: Franco arcillo-arenoso

A: Muy Angulo

B: Anguloso

C: Subangulares

Ds: Subredondeados

E: Redondeado

Tabla 4. Composición química elemental y mineralogía del Perfil M1

OXIDOS TOTALES EN EL SUELO TOTAL														
Horiz.	Prof. cm	SiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	MnO %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	H ₂ O* %	Total	Relaciones molares SiO ₂ /Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ / SiO ₂ /SiO ₂ / R ₂ O ₃
A	0-20	67.72	2.31	15.07	3.27	.05	2.83	4.08	3.24	2.89	0.68	1.46	108.6	7.63 / 77.91 / 6.95
													1	
TAS	20-150	64.59	3.45	17.72	3.29	0.05	2.97	5.11	2.70	2.96	0.05	1.97	108.7	6.19 / 49.76 / 5.50
													3	
A K de		79.63	2.72	17.72	3.85	0.06	3.33	4.80	3.81	3.40	0.80	1.72	5.91	
Al ₂ O ₃		+15.0	-0.73	0.00	+0.55	+0.01	+0.35	-0.31	+1.10	+0.43	+0.74	-0.25	+2.03	
Péridas y/o Ganacias de														
OXIDOS LIBRES EN EL SUELO TOTAL														
Horizonte	Profundidad cm	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Relaciones molares SiO ₂ /Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ Libre / Fe ₂ O ₃ total									
A	0-20	0.24	0.11	0.03	13.75	2.23	4.72							
TAS	20-150	0.24	0.21	0.04	11.05	1.13	6.20							
MINERALOGIA DEL SUELO EN LA FRACCION ARCILLA														
Horizonte		Profundidad cm	Minerales cristalinos		Minerales Amorfos									
A		0-20	KH, Fd, Qz		Ferrhidrita (%)									
			Alofano (%)		0.68									
TAS		20-150	KH, Fd, CM		0.20									
			Qz: Cuarzo		0.33									

KH: Metahalosita (halosita 10A) Fd: Feldespatos Qz: Cuarzo CM: Interestratificados

B. PERFIL M1A**Clasificación propuesta**

Soil Taxonomy, 1994: Intergrado Lithic Ustorthent - Typic Ustocrept

FAO- UNESCO, 1990: Leptosol Districo

Elevación: 1775 m.s.n.m.

Geomorfología: Planicie ligeramente ondulada.

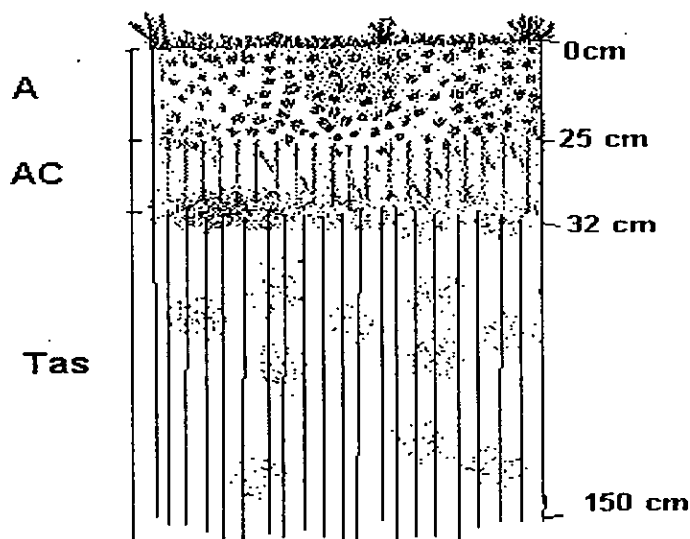


Figura. 10. Esquema del perfil M1A

En el perfil M1A fueron identificados dos subhorizontes: un horizonte A superficial de 25 cm de espesor, al cual subyace de forma gradual e irregular en dirección de la pendiente y un subhorizonte AC transitorio con 7 cm de espesor. Debajo del subhorizonte AC y separado igualmente en forma irregular y gradual, una capa endurecida denominada toba alterada silicificada (TAs), localizada a partir de los 32 cm de profundidad hasta más de 150 cm de la superficie (Fig. 10).

Los cambios texturales a través de los horizontes sugieren procesos rápidos de alteración físico-química, que involucran transformación química del material parental y subsecuentemente transporte, a partir de la eluviación e iluviación de arcilla hacia el subhorizonte de transición AC. Por otro lado, las formas subangulares de la arena y los limos en los perfiles, reafirma que los mecanismos de depósito de la ceniza son aéreos.

Los análisis físicos de densidad real y aparente expresan para el horizonte superficial un material con porosidad total alta, el siguiente subhorizonte es duro, pero con muchas grietas, característica que se refleja en el aumento de los valores de densidad aparente y real, y en disminución de la porosidad total. La capa endurecida es masiva, dura y posee densidad aparente mayor a los subhorizontes superiores, propiedad que proporciona baja porosidad total (tabla 6b.).

Ante todo, estas propiedades expresan los procesos de alteración físico-química de la ceniza endurecida, la cual ha sufrido agregación y disgregación, por la acción biológica y biomecánica de la materia orgánica. En el horizonte de transición también está claro la acción cementante de los óxidos de Fe y arcilla, los cuales propician aumento en la densidad aparente y disminución de la porosidad.

Las características químicas asociadas al horizonte superficial son: pH ligeramente ácido, muy bajo contenido de materia orgánica, CICT baja, así como la suma de bases, el Ca^{++} representa el elemento más importante en el intercambio de bases. El subhorizonte AC mantiene su pH ligeramente ácido, el contenido de materia orgánica disminuye, mientras que la CICT y la saturación de bases aumentan en una ligera proporción, en el complejo de cambio de bases el Ca^{++} y el Mg^{++} , dominan en la solución.

Mientras que en la capa endurecida o toba alterada, los atributos químicos cambian ligeramente, ya que el pH aumenta, la sumatoria de bases se mantiene sobre el mismo valor, el

El horizonte superficial es un horizonte de diagnóstico ócrico, que posee una consistencia suelta y muy friable, con estructura de bloques subangulares finos y moderadamente desarrollados (tabla 6a). En el subhorizonte AC, de transición, se observa la alteración de la toba a partir de las zonas de ruptura o grietas, éste es bastante discontinuo en su espesor y conserva el color del horizonte superficial, a pesar de la presencia de moteados y nódulos negros y amarillos (colores no determinados en la tabla Munsell).

La estructura es de bloques subangulares gruesos y sueltos, de consistencia muy firme y dura, ligeramente adhesivo y plástico, con presencia de películas de arcilla distinguidas a simple vista. La capa endurecida está separada en forma irregular y gradual con relación al horizonte AC. , es de color blanco en seco y pardo amarillento en húmedo, con estructura masiva y desarrollo de columnas ligeramente desarrolladas, consistencia firme y extremadamente dura (tabla 6b.).

Esta secuencia estructural y cambios de color, pone en evidencia procesos de alteración físico-química del material consolidado, principalmente por la acción mecánica de las raíces, la transformación de la material orgánica y la alteración del vidrio volcánico. En el horizonte de transición se observa óxidos de hierro iluviados como resultado de procesos de oxidación e hidrólisis de materiales ferromagnesianos, que se acumulan en el suhorizonte AC, ya que está limitada por la capa endurecida.

La textura en el horizonte superficial es franco arenoso, con predominio de arena fina y gruesa, que visto bajo un microscopio petrográfico corresponden, principalmente, a vidrio volcánico incoloro. En el subhorizonte AC la textura es franco arcilloso, en la fracción gruesa la arena muy fina, es de forma subangular y con baja esfericidad, finalmente, la textura en la capa endurecida es franco limoso con predominio en la fracción gruesa de arenas finas y muy finas, de formas muy angulosas (tabla 5b).

valor de CICT incrementa, de tal manera que, disminuye la saturación de bases. En esta capa se presenta gran cantidad de Mg^{++} en el complejo de cambio, seguido en menor proporción de Ca^{++} (tabla 6c.).

El pH ligeramente ácido es la condición que controla los diferentes procesos de alteración en este perfil, el cual está afectado, levemente en la superficie, por la presencia de materia orgánica. Al igual que en el perfil M1, se identifica una incongruencia con respecto al contenido de arcilla y materia orgánica, y el valor elevado de la CICT en los subhorizontes, principalmente los subsuperficiales, factor que está atribuido nuevamente al valor subestimado del contenido de arcilla, determinada, mediante el análisis de textura.

La presencia de Ca^{++} y Mg^{++} , en proporciones significativas, está asociada a los procesos de alteración de feldspatos y minerales ferromagnesianos como anfíboles y piroxenos. Las relaciones de antagonismo y/o sinergismo entre las bases son muy semejante a las del perfil M1, en donde el contenido de Ca^{++} y Mg^{++} representan los factores de control y manejar para el uso agrícola de estos suelos.

La composición elemental en óxidos totales en el suelo, muestra la presencia de cenizas dacíticas (tabla 7). La composición en óxidos de sílice entre los subhorizontes manifiesta procesos de alteración pedoquímica del material, en el cual se pierde sílice hacia los horizontes subyacentes, mediante mecanismos de desilificación, eluviación e iluviación, evidenciando la alteración de la toba consolidada para formar un horizonte de transición y a la vez mecanismos de silificación aportando posiblemente material cementante a la misma. De igual manera, como se identificó en el perfil M1, la variación en el contenido de sílice a través de los subhorizontes, inducen a pensar en un proceso de rejuvenecimiento del perfil, mediante aportes de cenizas.

La determinación de pérdidas y ganancias de los óxidos totales de los subhorizontes superficiales con respecto a la capa endurecida, arroja pérdidas significativas de óxidos de sílice, por los mecanismos desilicificación y lixiviación como se anotado anteriormente (tabla 7). Asimismo, se presentan ganancias de bases como manganeso, calcio, magnesio, sodio, hierro y potasio, que representan los elementos provenientes de los minerales componentes de las cenizas depositadas nuevamente.

En la determinación de las relaciones de alteración Si/Al , Si/Fe y Si/R_2 , se hace más evidente los procesos de rejuvenecimiento, ya que, el subhorizonte AC, posee relaciones más altas, lo cual indica alteración de las cenizas antiguas y más recientes, en la base y la superficie de este subhorizonte (tabla 7.).

El comportamiento de los óxidos libres en este perfil, muestra gran acumulación de óxidos de hierro en el subhorizonte de transición AC, lo cual expresa condiciones locales de mayor humedad que propician mecanismos fuertes de hidrólisis y eluviación de los minerales ferromagnesianos, que pueden promover en el futuro un la formación de horizonte de acumulación de óxidos de hierro.

La fracción arcilla del horizonte A esta compuesta por caolinita, feldspatos sódicos, cuarzo e interestratificados (tabla 7.). Los compuestos no cristalinos de alofano más imogolita y ferrihidrita tan solo se cuantifican en proporciones muy bajas. En el subhorizonte y capa subyacentes se identifican los mismo minerales, además, haloisita 7\AA , la fase amorfa de alofano más imogolita permanecen en la misma proporción.

Los procesos de transformación mineralógica de este perfil son muy semejantes, al anteriormente discutido, sin embargo, a diferencia del perfil M1, se identifica la presencia de arcilla caolinita, la cual corresponde a un mineral secundario más estable, formado, principalmente, a

partir de la transformación de arcillas haloisitas, por pérdidas de bases, bajo condiciones de humedad y buen drenaje.

En el horizonte A, a pesar de la mezcla por depósito de nuevas cenizas, aparentemente, las condiciones locales de humedad han permitido la transformación rápida de estos minerales, promoviendo la formación de arcillas caolinitas, situación que se refleja discretamente en el horizonte y capa subyacentes. Asimismo, la presencia de haloisita 7Å, tanto en el subhorizonte AC como en la capa endurecida, provee información de condiciones de menor humedad, de ahí que, mayor concentración de sílice, que favorecieron la permanencia de estos minerales, en perfil evolucionado anteriormente a los últimos depósitos.

Las observaciones realizadas a nivel micromorfológico exhiben un material de textura franco arenosa, en medio de una matriz fina de ceniza e impurezas de vidrio volcánico. La fábrica está compuesta por estructura de bloques subangulares, débilmente desarrollados con una microestructura compleja. Los poros son de tipo cámara, cavidad y fisura. La distribución relacionada (c/f) porfirica cerrada y abierta, característica de materiales que fueron consolidados en el momento de depositación y no han sido reorganizados por procesos de transporte.

En esta lámina se identifica arcilla autígena, es decir minerales secundarios, que se formaron contemporáneamente en el proceso de consolidación geológica del material, dentro de la matriz. Los rasgos pedológicos están representados por arcilla neoformada recubriendo los clastos, denotando flujos preferenciales que propician la eluviación e iluviación de arcillas (Fig. 10a.). Es frecuente la presencia de granos cubiertos por productos de alteración de magnetita en forma de Fe_2O_3 , que al igual que la arcilla aporta características secundarias de cementación del material. Las pedocaracterísticas en esta muestra son abundantes, correspondiente a expresiones de los procesos de alteración físico-químicos antes enunciados.

En las observaciones de las láminas se identifican de vidrio volcánico de color incoloro, líticos con bordes de alteración, plagioclasas, minerales opacos, ferromagnesianos como piroxenos y biotita, se observan manchas de color negro como producto de alteración de los minerales opacos Fig. 9.

La evolución de este perfil es semejante al anterior, ya que se trata de la alteración de cenizas consolidadas de composición química similares, con evidencias de rejuvenecimiento por adiciones posteriores, bajo las mismas condiciones edafoclimáticas. Sin embargo, como se observa en la descripción morfológica, éste perfil presenta un horizonte de transición, en el cual se acumulan arcilla y óxidos de hierro, que expresa, claramente la formación inicial de un horizonte de acumulación.

En su fase mineral posee arcilla mas evolucionadas como es la caolinita, propiciadas por condiciones mas acentuadas de humedad y buen drenaje, conservando los rastros de arcillas haloisíticas que se formaron bajo condiciones de mayor concentración de sílice.

La comparación de los perfiles M1 y M1A, en las expresiones morfogenéticas, sugiere, finalmente, que se trata de la evolución del mismo suelo, en la cual se observa una fase de mayor evolución. Del perfil M1A, se puede decir que los procesos de alteración edafológicos están favorecidos por condiciones locales de drenaje y humedad, que propician mayor desbasificación, hidrólisis del vidrio volcánico y alteración de minerales ferromagnesianos.

En la clasificación, se consideran los mismos criterios utilizados en el perfil M1, a pesar de que éste, posee mayores expresiones de alteración edafológica.

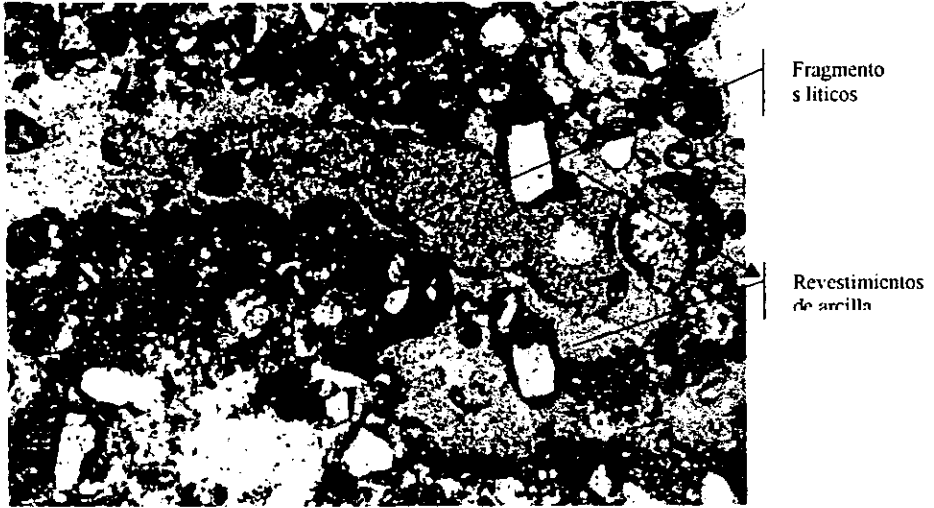


Figura 10a. Procesos de flujos preferenciales que promueven la iluvición de arcillas, ejerciendo una acción cementante sobre el material. Luz plana, 10X.

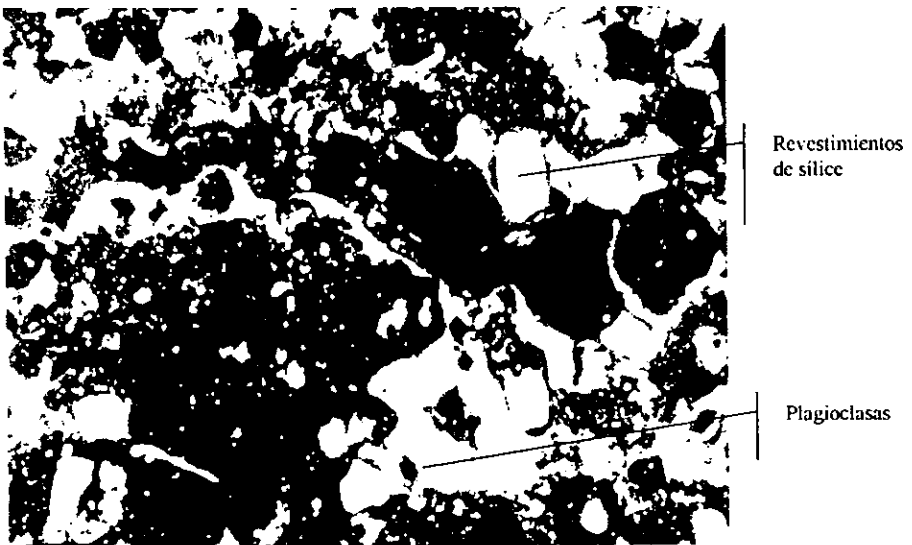


Figura 10b. Bajo nicotes cruzados se observan minerales revestidos de sílice, plagioclasas y fragmentos líticos. 10X.

Tabla 6a. Caracterización morfológica del Perfil M1A

Horizonte	Profundidad cm	COLOR		Estructura		Consistencia		Textura	Separación	Observaciones
		Húmedo	Seco	bsa - f - mo	fr	mojado	seco			
A	0-25	10YR 4/4 Pardo amarillento obscuro	10YR 5/3 Pardo	bsa - f - mo	fr	na/np	CA	CA	gradual, plana	Presencia abundante de raíces
AC	25-32	10YR 3/4 Pardo amarillento	10YR 5/3 Pardo	bsa-g-s	mf	La/p	Cr	Cr	gradual, plana	Películas de arcilla
TA _s	32-150	10YR 5/6 Pardo amarillento	2,5Y 8/2 Blanco	m	fi	La/Lp	Cr	Cr		Moleados negros y amarillentos

MORFOLOGIA

Tabla 6b. CARACTERISTICAS FISICAS

Hz.	Prof.	Densidad Mg/m ³	Porosi.	Clase Textural fracción menor de 2mm		Arcilla		Redondez y Esfericidad								
				Arena (%)	Limo (%)	Arcilla	Arenas finas (%)	Limos medios (%)	A	B	C	D	E			
cm	Apare	Real	%	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.10	0.05-0.02	0.005-0.002	0.005-0.002	A	B	C	D	E	
A	0-25	1.19	2.36	55.09	1.03	4.37	6.41	22.62	21.87	6.71	11.60	0.00	25.02	33.6	38.4	25.3
AC	25-32	1.37	2.23	48.30	2.60	4.63	6.37	3.43	17.25	13.1	17.56	2.24	28.38	40.8	36.3	17.4
TA _s	32-150	1.49	2.20	43.77	0.40	2.61	5.74	12.74	13.63	10.6	18.52	6.84	28.90	55.4	39.0	5.40

Tabla 6c. CARACTERISTICAS QUIMICAS

Prof.	pH	M.O	C.I.C.T.	Bases Intercambiables				Σ Bases	Sat. Bases	P. aprov.	Relaciones						
				cmol ⁺ /Kg	Na	K	Ca				Mg	cmol ⁺ /Kg	%	ppm	(Ca+Mg)/K	Ca/Mg	K/Ca
Hz.	cm	H ₂ O	KCl	ApH	%	cmol ⁺ /Kg	Na	K	Ca	Mg	cmol ⁺ /Kg	%	ppm	(Ca+Mg)/K	Ca/Mg	K/Ca	PKI
A	0-25	6.50	5.00	0.50	1.84	19.30	0.08	0.62	5.00	1.00	6.70	34.69	0.69	6.63	5.00	0.12	0.03
AC	25-32	6.60	4.80	1.80	1.09	37.00	0.14	0.92	7.00	4.00	12.07	32.61	1.20	11.34	1.75	0.13	0.02
TA _s	32-150	7.00	5.00	2.00	0.07	78.00	0.34	1.13	3.00	9.00	13.46	17.26	0.87	10.99	0.33	0.38	0.01

bsa: Bloques subangulares f: Fino g: Grueso S: suelto p: Plástico
 fr: Fríasle mf: Muy fino fr: firme de: Extremada/ débil na: No adhesivo La: Ligeramente adhesivo
 A: Muy anguloso B: Anguloso C: Subanguloso D: Subredondeado E: Redondeado Lp: Ligeramente plástico Cr: Franco arcillosos CA: Franco arenosos
 mg: Muy grueso np: No plástico

Tabla 7. Composición química elemental y mineralogía del Perfil M1A

OXIDOS TOTALES EN EL SUELO TOTAL														
Prof. cm	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O*	H ₂ O*	Relaciones molares	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	
													SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	
													Total	
													SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	
													SiO ₂ /R ₂ O ₃	
A	0-25	67.33	2.22	15.45	3.26	0.06	3.68	2.69	2.69	0.27	1.76	5.74	107.62	7.40
AC	25-32	65.83	2.40	14.65	3.26	0.09	2.28	2.02	2.02	0.04	3.57	6.8	104.63	80.61
TA ₁	32-150	68.27	1.60	12.73	3.21	0.02	1.19	2.18	1.34	0.18	4.42	7.35	103.87	6.77
AC*K de		57.20	2.09	12.73	2.84	0.08	1.43	1.99	1.76	0.04	3.10	5.91		
Al ₂ O ₃														
A*K de		55.48	1.83	12.73	2.69	0.05	2.03	2.22	2.22	0.22	1.45	4.73		
Al ₂ O ₃														
Pérdidas y/o Ganancias		-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-		
de AC		11.07	0.48	0.00	0.38	0.06	0.24	0.20	0.41	0.14	1.31	1.44		
Pérdidas y/o Ganancias		-	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-		
de A		12.79	0.23	0.00	0.53	0.03	0.84	0.87	0.87	0.03	2.97	2.62		

OXIDOS LIBRES EN EL SUELO TOTAL							
Horizonte	Profundidad cm	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)			
				Relaciones molares			
				SiO ₂ /Al ₂ O ₃			
				SiO ₂ /Fe ₂ O ₃			
				Fe ₂ O ₃ libre/Fe ₂ O ₃ total			
A	0-25	0.22	0.53	0.04	8.975	0.42	24.01
AC	25-32	0.34	0.79	0.09	6.49	0.44	32.88
TA ₁	32-150	0.35	0.14	0.03	18.45	2.58	8.44

MINERALOGIA EN LA FRACCION ARCILLA						
Horizonte	Profundidad cm	Minerales cristalinos			Minerales Amorfos	
		Alafano (%)	Ferrhidrita (%)	Al _{ox} +1/2Fe _{ox}		
A	0-25	Kk,Fd,Qz y CM	1.78	0.78	0.66	
AC	25-32	Kh,Kk,Fd,Qz y CM	1.71	0.46	0.34	
TA ₁	32-150	Kk,Kh,Qz y CM	1.78	0.18	0.30	

Fd: Feldespatos Kh: Halosilis Qz: Cuarzo CM: Interstratificados

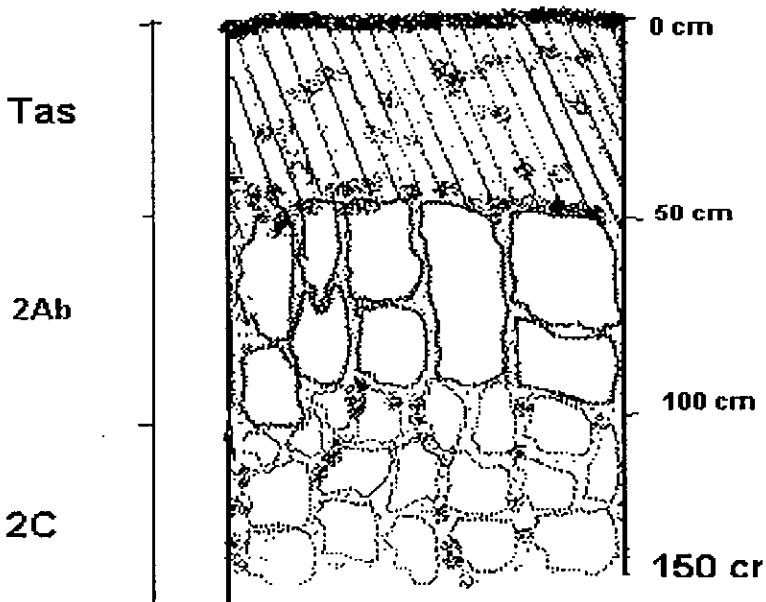
C. PERFIL M2**Clasificación propuesta**Soil Taxonomy, 1994: **Typic Ustorthents**FAO- UNESCO, 1990: **Leptosol Eutrico***Geomorfología: Meseta disectada**Elevación: 1650 m.s.n.m.*

Figura 11. Esquema del Perfil M2

Este perfil está constituido por dos capas de cenizas, aparentemente de diferentes depósitos estratigráficos, semejantes a dos tipos de tobas consolidadas (Fig.11.). Ya que, el perfil fue muestreado en una zona con el material endurecido expuesto, y a su alrededor, zonas con un espesor de suelo muy somero, se considera que el horizonte superficial está completamente erosionado. En primera instancia, se localiza una capa de cenizas dura y debajo de ésta, dos horizontes subsuperficiales, separados entre sí, en forma horizontal y gradual.

La primer capa superficial es de 50 cm de espesor, de color amarillo pálido y estructura masiva, extremadamente fuerte y extremadamente duro, consistencia no adhesiva y no plástica, correspondiente a una toba alterada y silicificada (TA_s) y expuesta directamente a la superficie. El subhorizonte que subyace, es un horizonte 2A enterrado, producto de la alteración de la toba abajo depositada, separada en forma plana y gradual, de color amarillo pálido, estructura de bloques subangulares muy gruesos, duros, moderadamente desarrollados, consistencia suave, ligeramente adhesiva y plástica. El siguiente subhorizonte 2C, está separado en forma gradual y plana, corresponde nuevamente a cenizas consolidadas, de color amarillo olivo, bloques subangulares muy gruesos, moderadamente desarrollados y muy duros, consistencia friable en húmedo, muy adhesivo y plástico (tabla 8a.).

Morfogenéticamente, este perfil evidencia la formación de un suelo estratificado, en donde se desarrolló un horizonte A, producto de la alteración de una capa de cenizas volcánicas, posteriormente, rejuvenecida por la adición de nuevas cenizas que se consolidaron, las cuales reiniciaron la alteración físico- química, pero, por mecanismos de erosión hídrica y eólica se perdió el epipedón superficial.

La textura en la superficie es franca, con dominio en la fracción gruesa de arenas finas, que vistas bajo el microscopio son de forma muy angular. El horizonte 2A_b, posee una textura franco arcillo arenosa, en donde prevalece, la fracción de arenas finas, con apariencia angulosa. El siguiente horizonte que corresponde a un 2C, posee una textura franco arcillo limosa, en este caso, la fracción de limos gruesos es mas representativa, cuyas formas son subredondeadas (tabla 8b.).

La textura en los diferentes horizontes de este perfil, es otra característica, que expresa dos secuencias de depósitos de cenizas ya que hacia los horizontes subyacentes la presencia de mayor cantidad de arcilla, pone de manifiesto, en esta fase, procesos anteriores de eluviación e iluviación, así como también, la alteración edafocímica del material parental.

La forma subangular y subredondeada en la arena fina y limo, respectivamente, en los tres horizontes, son similares en proporción, a pesar de que se afirma, que se tratan de dos tipos de depósitos, esto, señala que los mecanismos de depósito fueron aéreos, muy semejantes, aunque las condiciones ambientales se hallan modificado.

En la capa superficial, la densidad real es mas alta que en los demás horizontes y su porosidad expresa buena aireación del material, mientras que, en los dos siguientes horizontes el aumento de la densidad aparente refleja una significativa disminución del espacio poroso total (tabla 8b).

A pesar que, en la superficie se determina mayor porosidad, esta propiedad no puede ser relacionada directamente con mecanismos de reorganización de las partículas por mecanismos de adición de la materia orgánica o pedoturbación, ya que hacia la capa superficial, la densidad aparente está asociada principalmente con procesos diagénéticos de consolidación; también, posiblemente a procesos secundarios de silicificación, y a los cambios en las propiedades del material parental.

Las características químicas expresadas en el horizonte superficial son: pH ligeramente alcalino, bajo contenido de materia orgánica, CICT y suma de bases, el complejo de bases está dominado por cationes de Ca^{++} y la saturación de bases es mayor de 50%, lo que permite identificar el suelo como Eutrico.

En el horizonte $2A_b$ el pH es neutro, con muy bajo contenido de materia orgánica, pero en proporción, relativamente mayor al anterior horizonte, igualmente la CICT. La suma de bases totales supera la CICT, de tal manera que, la saturación de bases es superior al 100%, este complejo está controlado, principalmente por el contenido de Mg^{++} y Ca^{++} . La capa siguiente es ligeramente alcalina, con muy bajo contenido de materia orgánica y CICT media. La suma de

bases mantiene la misma proporción que el anterior horizonte, con altos contenidos de Ca^{+2} y Mg^{+2} (tabla 8c).

Las anteriores características químicas de las capas a lo largo del perfil M2, corroboran los mecanismos de rejuvenecimiento del suelo en el área, mediante adición de nuevas cenizas. Subsecuentemente, mecanismos de desbasificación e eluviación producto del intemperismo del vidrio volcánico, feldespatos y lixiviación de la solución de la capa superficial, han generado acumulación de bases en el horizonte 2A_b, de ahí que, la saturación en este horizonte supera el 100%. Por otro lado, la desbasificación de la capa 2C, sugiere que, el material de esta capa, posee minerales de menor resistencia a la alteración y expuesta a condiciones ambientales diferentes, que favorecieron la formación de más contenido de arcilla, brindando al material, mayor capacidad de intercambio catiónico.

El contenido de bases, muestra que las cenizas últimamente depositadas poseen mayor concentración de Ca^{++} y condiciones de alteración más básicas. Mientras que, en la capa subyacente el complejo de cambio ha sido dominado por las concentraciones de Mg^{++} , asociadas a las propiedades del material parental, situación que debió propiciar neoformación de arcillas motmorillonitas.

Ya que los mecanismos de alteración del material parental son muy semejantes, así como también, la composición mineralógica, la presencia de fósforo aprovechable es muy baja, por razones expresadas anteriormente. Las relaciones sinérgicas entre las bases intercambiables están limitadas entre sí por la abundancia en la solución de Ca^{++} y Mg^{++} .

La tabla 9. muestra la composición elemental representado en los óxidos totales del suelo total, correspondiente en las dos capas a dos fases de depósitos de cenizas félsicas, de carácter dacítico. Sin embargo, el depósito superficial posee mayor contenido de óxidos de sílice, cercano

a los límites de composición de cenizas tipo riolítico, las cuales no han sido fuertemente desilificadas, mientras que, la composición de la capa subyacente, expresa las características de cenizas dacíticas, con mayor alteración geoquímica. Ya que, la capa superficial muestreada no corresponde a un horizonte edáfico propiamente dicho, en este perfil no se establece el análisis de pérdidas y ganancias de óxidos entre la capa superficial y los subhorizontes de los depósitos subyacentes.

Las relaciones de alteración Si/Al , Si/Fe y Si/R_2 , son altas, asociadas a la baja evolución de los materiales. La diferencia de los dos tipos de depósitos, se expresa también en estas relaciones, ya que, en el horizonte superficial, los valores son mayores, esto puede asociarse de nuevo, a la naturaleza de las cenizas, que probablemente sufrieron procesos más rápidos de alteración, por poseer minerales menos resistentes. Comparativamente, con la alteración de las cenizas arriba depositadas, dada su naturaleza riolítica, estos dos tipos de materiales son poco desarrollados:

El contenido de óxidos libres en los horizontes está representado por los óxidos de sílice, seguido en proporción por los de hierro (tabla 9). Como se ha afirmando, la desilificación es el proceso más importante en estos materiales, además, la información química, induce a pensar que debido al bajo desarrollo del suelo, existen muchos minerales silicatados que controlan la presencia de sílice en solución. De nuevo, la presencia, de mayor contenido de óxidos libres de sílice en la capa 2C, confirma, que se trata de material mas fácilmente alterable.

La tabla 9, también presenta la composición mineralógica de la fracción arcilla cristalina y no cristalina. En la fase cristalina de la capa superficial está constituida por minerales primarios como feldespatos sódicos, cuarzo y minerales secundarios de haloisita 10\AA , caolinita, e interstratificados y en la fracción no cristalina las proporciones de alofano mas imogolita y ferrihidrita son muy pequeñas. En los horizontes subyacentes $2A_b$ y $2C_s$, poseen minerales

primarios como feldespatos sódicos, y secundarios como haloisita 7Å, haloisita 10Å e interstratificados, la presencia de alofano e imogolita y ferrihidrita, igualmente es muy pequeña, pero relativamente mayor al horizonte superficial.

Como se ha inferido anteriormente, tanto las condiciones de alteración, como la naturaleza del material parental en éstas dos capas, son diferentes, de ahí, que se espera, variación en la composición mineralógica, de la fracción arcilla. En la capa superficial, se identifica la presencia de haloisita, caolinita, feldespatos, cuarzo e interstratificados, entre ellos; los minerales secundarios, que han sido promovidos, principalmente, por las condiciones de alteración húmedas, aunadas a la riqueza de bases del medio, a pesar, de la naturaleza riolítica del material, que también permite la cristalización del cuarzo y la estabilidad de algunos feldespatos. Mientras que en la capa subyacente los factores de transformación mineralógica han sido controlados, ante todo, por la naturaleza del material, que propicia menor concentración de sílice y bases y favorece, preferencialmente, la formación de arcillas haloisitas.

Por otro lado, las condiciones ambientales, como la humedad y contenido de materia orgánica, en la capa superficial y el sobre todo en el subhorizonte 2A_b, para mantener estable, mayor concentración de alofano e imogolita, sin embargo, a pesar de los contenidos bajos de éstos minerales, la presencia de ésta fase, evidencia, de otra forma, procesos de alteración edafológica de los minerales primarios, promovidos y a la vez limitados por el contenido de materia orgánica.

La descripción micromorfológica de la lámina delgada del horizonte superficial, que corresponde a la toba consolidada, posee una textura arcillo limosa, embebida en una matriz muy fina. Fábrica compuesta por una estructura masiva y microestructura compleja, donde está relacionada con la microestructura de rompimiento y de cámara.

La matriz está compuesta por granos muy finos de ceniza criptocristalina, que conforman una distribución referida (c/f) porfirica abierta, con granos muy empaquetados, que expresan nuevamente los mecanismos eólicos de los depósitos vulcano-sedimentarios (Fig. 12a). Al interior de esta matriz consolidada, se manifiestan abundantes procesos de pedoturbación, por acción biológica, las cuales proporcionan al material su porosidad.

Los rasgos pedológicos están caracterizados por revestimientos de arcilla, ejerciendo una acción cementante secundaria, en combinación con SiO_4 en forma de cuarzo (Figs. 12a y 12b). Al interior del cementante se observan pequeñas fisuras, como manifestaciones de rompimiento, debido a la acción del clima, por los ciclos de humedecimiento y secado. En la Fig. 12b. se observa, principalmente, vidrio volcánico incoloro, fragmentos de roca volcánica alterada, minerales opacos (magnetita), feldespatos, ferromagnesianos como biotita y anfíboles.

Teniendo en cuenta varias expresiones físicas, químicas y minerales de este perfil, se puede reconocer que el material subyacente, posee materiales menos resistentes a la alteración, tales como vidrio volcánico y minerales ferromagnesianos, mientras que, las cenizas antes depositadas, contienen mayores contenidos de sílice que le proporcionan más resistente a la alteración, aún bajo condiciones de mayor humedad.

Este perfil representa, frecuentemente un ejemplo de un suelo estratificado, en el cual los factores de formación que inciden principalmente, son los ciclos de depósitos volcánicos, que determinan el constante rejuvenecimiento, también, representa una muestra de lo que puede sucederle en caso de que los procesos específicos más importantes sean pérdidas por erosión.

Siguiendo una secuencia comparativa con respecto a los perfiles antes discutidos, se puede decir, que éste, muestra claramente, el proceso de rejuvenecimiento, que en los otros, tan

sólo se incinuaba. Lo anterior, indica, que éste perfil ésta ubicado mas cerca del foco u orígenes de los factores de emisión de nuevas cenizas, ya que, se ven expresadas morfológicamente.

También, de acuerdo a las características químicas y mineralógicas expresadas, marcan de manera mas clara, cambio climáticos en el tiempo de alteración de estas dos fases mineralógicas, en donde condiciones de mayor humedad, han propiciado, alteración más rápidas de las últimas cenizas depositadas.

Desde el punto de vista de clasificación, las expresiones morfogenéticas tan pobres, permiten ubicar este perfil en el orden Entisol, con pocos rasgos morfológicos diferenciales.



Figura 12a. Se observa una matriz de ceniza criptocristalina, embediendo gran parte de los granos, así como también arcilla ejerciendo una acción cementante sobre los granos. Se observan ferromagnesianos alterados. Luz plana 10X.

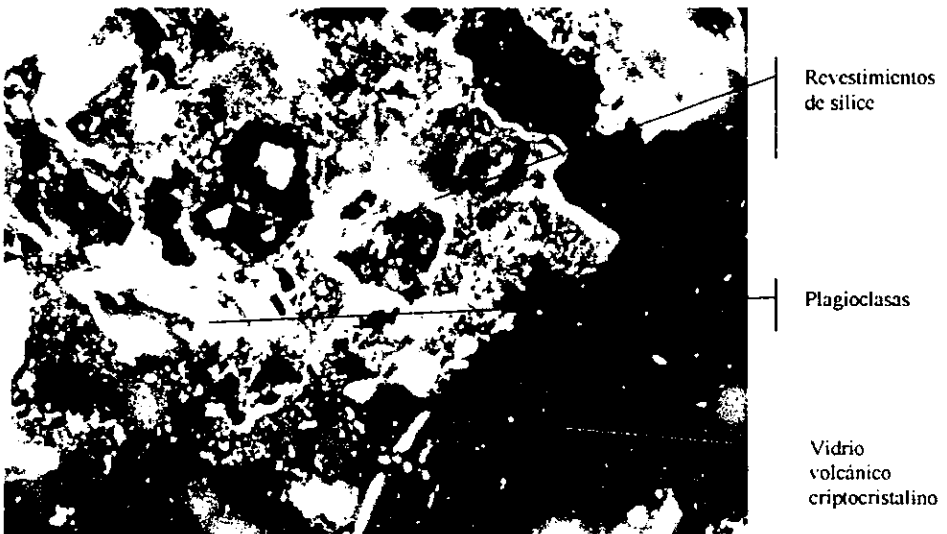


Figura 12b. Se observa la acción cementante de sílice, plagioclasas, ferromagnesianos y la matriz criptocristalina de vidrio volcánico.

Tabla 8a. Caracterización morfológica del Perfil M2

MORFOLOGIA									
Horizonte	Profundidad	COLOR		Estructura	Consistencia		Textura	Separación	Observaciones
cm	cm	Húmedo	Seco		Húmedo	Seco	Mojado		
TAs	0-50	2.5Y 4/4 Pardo Olivo	2.5Y 7/4 Amarillo Pálido	m - S	ef	ed	na/np	C	gradual plana Capa endurecida
2A _b	50-100	10YR 4/4 Pardo a amarillento oscuro	2.5Y 6/4 Amarillento claro	bsa - S mo	s	D	La/np	CrA	gradual-plana expuesta
2C	100-150	2.5Y 5/4 Pardo olivo claro	2.5Y 6/6 Amarillo olivo	bsa - S - mo	fr	D	ma/p	CrL	

Tabla 8b. CARACTERISTICAS FISICAS

Hz.	Prof.	Densidad Mg/m ³	Porosi. %	Clase Textural fracción menor de 2mm			Redondez y Esfericidad														
				Arena (%) mm	Limo (%) mm	Arcilla	Limos medios (%)														
cm	cm	Real	%	2-1	0.5-0.25	0.25-0.10	0.10-0.05	0.05-0.02	0.02-0.002	A	B	C	D	E	F						
TAs	0-50	1.24	2.44	53.21	0.18	1.03	6.42	21.65	2.11	14.4	14.3	3.24	17.7	11.4	39.7	30.0	18.5	78	21.3		
2A _b	50-100	1.66	2.33	37.36	0.51	6.46	12.19	20.61	10.13	14.9	0.0	1.48	33.74	15.7	55.7	21.3			53.7	46	
2C	100-150	1.67	2.27	36.98	0.71	1.04	1.06	2.20	4.52	36.3	9.8	6.64	37.66	37.4	44.7	15.6			21.3	71	7.1

Tabla 8b. CARACTERISTICAS QUIMICAS

Prof.	pH	M.O C.I.C.T. Bases Intercambiables cmol*/Kg										Σ Bases			Sat. Base			P. aprov.			Relaciones		
		H ₂ O	KCl	apH	%	cmol*/Kg	Na	K	Ca	Mg	cmol*/Kg	%	ppm	(Ca+Mg)/K	Ca/Mg	K/Ca	PKI						
cm	cm	f. Fino	m. Masiva	fi. firme	g. Grueso	si. suelo	de: Extremadamente débil	de: débil	de: Plástico	de: No adhesivo	de: Ligamente adhesivo	de: Plástico	de: Franco arenosos	de: Franco arcillosos	de: No plástico								
TAs	0-50	7.90	6.30	1.60	0.55	15.0	0.51	1.90	10.0	1.0	13.4	89.35	1.38	10.53	10.0	0.19	0.13						
2A _b	50-100	7.20	4.90	2.30	0.75	17.3	0.16	0.87	6.0	13.0	20.03	100	1.38	20.93	0.46	0.15	0.05						
2C	100-150	7.65	5.40	2.25	0.62	31.0	0.39	1.13	8.0	11.0	20.53	66.18	1.53	17.76	0.73	0.14	0.04						

Tabla 9. Composición química elemental y mineralogía del Perfil M2

OXIDOS TOTALES EN EL SUELO TOTAL																	
Prof.	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O*	H ₂ O*	Relaciones molares				
Horiz.	cm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	Total	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	SiO ₂ /R ₂ O ₃	
TAs	0-50	70.07	2.60	14.47	3.27	0.05	2.44	4.05	2.70	3.90	0.05	1.83	3.59	109.0	8.22	71.63	7.37
2A _b	50-100	65.83	2.80	17.53	3.20	0.05	2.97	5.44	2.70	2.89	0.09	2.62	4.76	110.8	6.37	62.49	5.78
2C	100-150	64.29	2.82	16.36	3.21	0.03	1.74	3.58	0.27	2.17	0.18	5.53	7.49	107.66	6.67	60.59	6.01
OXIDOS LIBRES EN EL SUELO TOTAL																	
Horizonte	Profundidad cm	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Relaciones molares												
					SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ Libre/Fe ₂ O ₃ total										
TAs	0-50	0.32	0.50	0.04	13.16	0.63	19.35										
2A _b	50-100	0.26	0.18	0.03	14.45	1.48	6.36										
2C	100-150	0.44	0.30	0.07	11.26	1.47	10.53										
MINERALOGIA DE LA FRACCIÓN ARCILLA																	
Minerales Amorfos																	
Horizonte	Profundidad cm	Minerales cristalinos	Alofano (%)	Ferrihidrita (%)	Al _{ox} +1/2Fe _{ox}												
TAs	0-50	Kh, Kk, Fd, Qz y CM	1.92	0.25	0.41												
2A _b	50-100	Fd, Kh, Kk y CM	2.14	0.22	0.40												
2C	100-150	Kh, Fd y CM	0.07	0.07	0.29												
Kk: Caolinita	Fd: Feldespatos	Qz: Cuarzo	Kh: Metaheulita	CM: Interstratificados													

D. PERFIL M3

Clasificación propuesta

Soil Taxonomy, 1994: Lithic Ustorthent

FAO- UNESCO, 1990: Regosol Téfrico

Altura: 1650 m.s.n.m.

Geomorfología: laderas

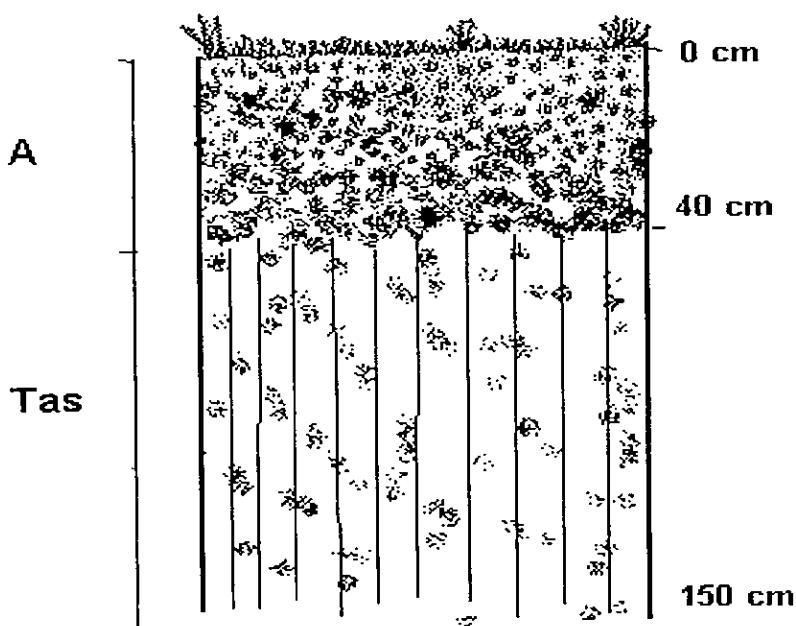


Figura 13. Esquema del Perfil M3.

El perfil M3 está constituido por un horizonte y una capa endurecida. El horizonte A, es de 40 cm de espesor, con características de un horizonte ócrico, separado en forma plana y abrupta del horizonte subyacente que corresponde a una capa de ceniza consolidada, denominada TA_s, que se extiende desde los 40 cm de profundidad hasta los 150 cm (Fig.13).

El horizonte A es de color pardo, cuyas características morfológicas son: estructura de bloques subangulares finos, consistencia muy firme y dura, muy adhesiva y ligeramente plástica, este horizonte está desarrollado a partir de una capa de cenizas asociada a una toba consolidada, de color amarillo pálido, con estructura masiva, consistencia en seco, dura y firme, ligeramente adhesivo y ligeramente plástico (tabla 10a). En el desarrollo morfológico del horizonte A, es evidente el efecto de la acción mecánica de los organismos y el intemperismo físico-químico, el cual ha inducido la transformación de propiedades como la estructura y el color.

Los cambios texturales en este perfil son muy discretos, permanencia constante la textura franca, con predominio las arenas finas y muy finas, de forma angular, en la capa endurecida hay mas partículas más gruesas (tabla 10b). Este comportamiento físico del material pone de manifiesto bajo nivel de alteración química, posiblemente por la naturaleza resistente de éste.

Otra de las características físicas importantes es la densidad aparente y real, que caracterizan el horizonte y la capa endurecida, como materiales de baja porosidad, esto indica que los procesos de reorganización de las partículas por efecto mecánico no son suficientemente fuertes para expresar mayor agregación y porosidad en la superficie.

El perfil, en el horizonte A es de pH neutro, mientras que en la capa subyacente es ligeramente alcalino (tabla 10c), éste factor esta asociado al contenido de materia orgánica en la superficie, que además de favorecer las condiciones de alteración del material por efectos químicos, se evidencia las la acción radical en la ruptura de material y formación de agregados.

La CICT esta relacionada con arcillas tipo 1:1 y su escaso contenido. La suma de bases y el complejo de cambio son bajas, representados por la actividad del Ca^{++} y Mg^{++} (tabla 10c.), debido, principalmente, al bajo intemperismo químico de los minerales.

La saturación de bases, en el perfil, es mayor de 50%, es decir que las condiciones climáticas de sequía prolongada o las propiedades físicas del suelo no permiten la lixiviación de las bases disueltas en la solución, a través de los horizontes, generando acumulación, principalmente en el horizonte superficial. Esta situación, reafirma las condiciones limitantes que impone una capa endurecida, para llevar a cabo los procesos de transporte dentro del suelo.

Las relaciones sinérgicas establecidas entre el Ca^{++} , Mg^{++} y K^+ , reportadas en la tabla 10c, y que determinan condiciones favorables para la producción y uso del suelo, no establecen interferencias marcadas entre ellos, por lo tanto no se considera el suelo limitado desde el punto de vista químico. Por el contrario, existe riqueza de éstos elementos, favorables para el desarrollo de las plantas. Al igual que en todos los perfiles anteriores, el nivel de fósforo aprovechable está limitada por las características del material parental y el bajo nivel de intemperismo químico, así como también, el bajo contenido de materia orgánica.

La composición elemental del suelo total, representado en los óxidos totales ubican el material parental dentro de la clasificación de cenizas intermedias dacíticas (tabla 11), Shoji, *et al.*, op cit. A diferencia de los anteriores perfiles, el contenido de sílice total es más bajo, probablemente, éste perfil, provenga de materiales depositados en momentos diferentes.

El análisis de pérdidas y ganancias, señala en el horizonte superficial, ganancias de minerales provenientes de nuevos depósitos de cenizas, proporcionando al horizonte características de rejuvenecimiento. Las pérdidas de bases determinadas, están asociadas a la lixiviación de los productos de alteración de los feldspatos y ferromagnesianos. A pesar del rejuvenecimiento del material, las relaciones molares de Si/Al , Si/Fe y Si/R_2 , indican mayor alteración de éstos depósitos, lo que quiere decir, que son más antiguos que los de los materiales que componen los perfiles anteriores.

La composición de óxidos libres a lo largo del perfil está dominada por Si y Fe, que indica abundancia de minerales ricos en sílice y hierro y las condiciones favorables de alteración de éstos, asociados a materiales de bajo desarrollo.

La composición mineralógica de la fracción arcilla, obtenida mediante análisis de difracción de rayos X, está distribuida en y minerales secundarios como haloisita 7Å e interstratificados y minerales primarios de feldspatos sódicos, cuarzo, mientras que, la presencia de alofano mas imogolita y ferrihidrita es muy escasa. Estos resultados, reflejan condiciones ambientales más secas, de tal forma que los procesos de alteración química en este perfil se han generado bajo condiciones de altas concentración de sílice y bases, permitiendo la formación de arcillas haloisitas y la cristalización de cuarzo. Por otro lado, estas condiciones secas predominantes, permiten también la acumulación de feldspatos no alterados.

Las características micromorfológicas de la capa endurecida observadas en las láminas, descritas bajo el microscopio petrográfico son: textura areno limosa, con clastos embebidos en una matriz gruesa de ceniza y arcilla autógena. Fábrica constituida por una estructura y microestructura masiva, b-fábrica cristalina y la distribución relacionada (c/f) porfirica cerrada (Fig. 14a y 14b). La anterior descripción expresa que el material está fuertemente consolidado, con partículas poco orientadas, lo cual relaciona el origen de depósito aéreo, así como también el bajo nivel de alteración del material.

Los escasos poros observados son tipo cámaras, de tamaño medio y fino, esto justifica la baja porosidad del material, antes expresada en la densidad aparente, y así como también, bajo influencia de la acción biológica en los procesos de pedoturbación.

Los rasgos pedológicos no son fuertes, sin embargo se encuentran pequeños revestimientos de los granos con arcilla sobre los granos de vidrio, ejerciendo una acción

cementante y expresando procesos de acumulación de está por efecto de la alteración *in situ* del material. En la composición mineralógica observada, predomina el vidrio volcánico en granos gruesos poco alterados, abundancia de ferromagnesianos entre ellos anfíboles y biotita, minerales opacos, micas y feldespatos (Fig. 14a).

La evolución de este perfil ha estado regida por dos condiciones predominantes, primero, la depositación eólica de las cenizas y subsecuente la consolidación, debido a los procesos diagenéticos establecidos, bajo los cambios climáticos globales en la zona, teoría antes enunciada. La segunda, tiene que ver con las condiciones ambientales en donde ha prevalecido sequía prolonga, que han permitido conservar consolidación del material.

Por otro lado, las características morfogenéticas en general, expresan algunos procesos específicos de transformación del material a través de la adición de materia orgánica en la parte superficial y alteración química mediante hidrólisis del vidrio volcánico y neoformación de arcillas haloisitas, que han marcado las condiciones para formar un horizonte A, en el cual se mezclan, materiales antiguos y cenizas recientes.

La clasificación taxonómica de éste perfil, lo ubica dentro del orden Entisol, ya que no hay presencia de un horizonte de acumulación o transición, pero contradictoriamente, a las condiciones ambientales, este perfil cumple dos criterios característicos de los suelos ándicos, con propiedades vítricas, ellas son abundancia de vidrio volcánico (observado en el microscopio petrográfico) y el criterio de $Al_{ox} + \frac{1}{2}Fe_{ox}$ mayor de 0.65% que ubican al perfil con propiedades semejantes a un suelo clasificado como Vitrandic Ustrocrept.

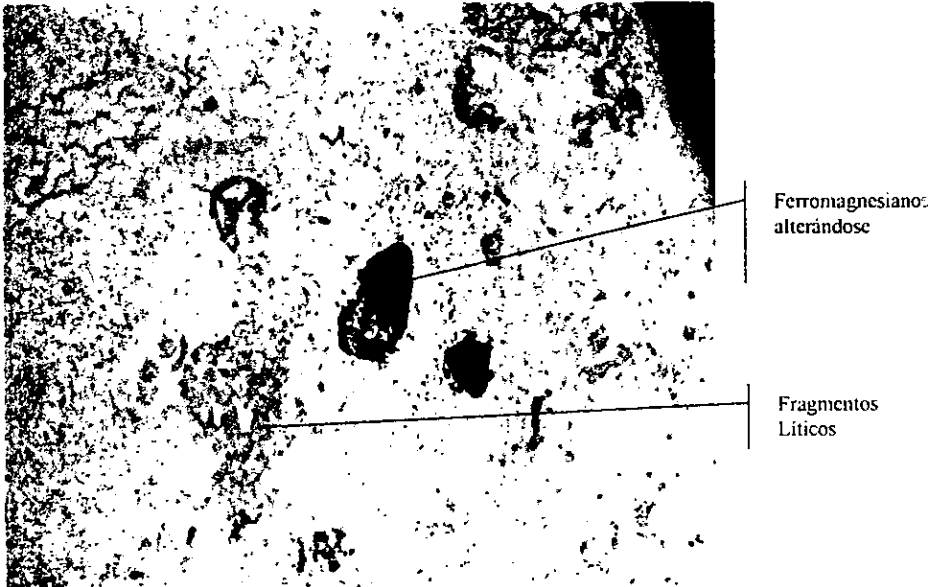


Figura 14a. El perfil M3, muestra en el horizonte subyacente un material con distribución porfirica cerrada, embebida en una matriz fina. Al interior se observa un halo de alteración de un ferromagnesiano. Luz plana, 10X.

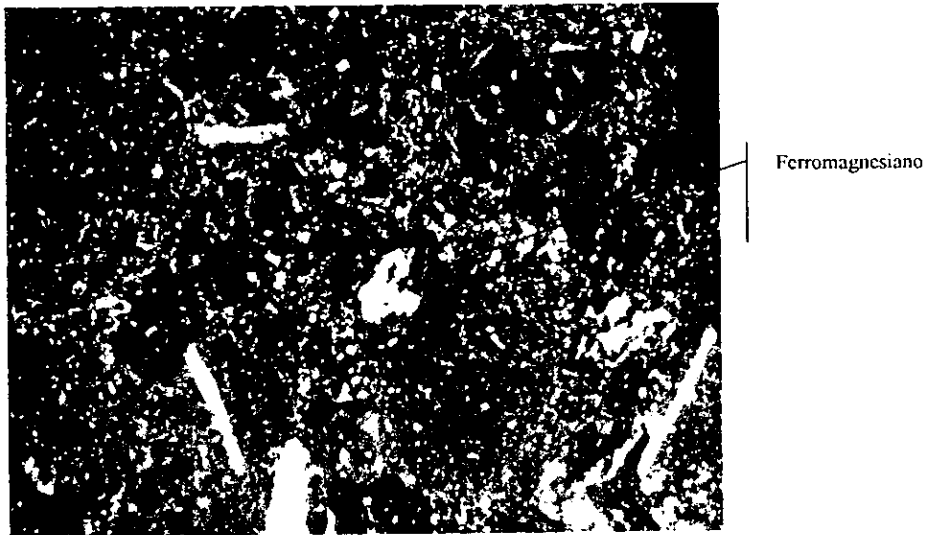


Figura 14b. Se observa poca orientación de partículas, entre ellas líticas, ferromagnesiano. Nícoles cruzados 10X.

Tabla 11. Composición química elemental y mineralogía del Perfil M3

OXIDOS TOTALES EN EL SUELO														
Horiz.	Prof. cm	SiO ₂ %	FeO ₃ %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	MnO %	CaO %	MgO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	P ₂ O ₅ %	H ₂ O- %	H ₂ O+ %	Relaciones SiO ₂ /Al ₂ O ₃ / Fe ₂ O ₃ / FeO ₃ / FeO ₃ total
A	0 - 40	63.74	2.82	17.11	3.24	0.05	2.24	2.72	2.70	1.92	0.25	3.53	6.46	106.77 / 6.32 / 60.07 / 5.72
TA _s	40 - 150	63.01	2.68	17.90	3.26	0.03	3.14	5.84	3.24	2.60	0.06	3.95	5.25	110.95 / 5.97 / 62.49 / 5.45
A*K de Al ₂ O ₃	66.68	2.95	17.90	3.38	3.38	0.05	2.33	2.84	2.81	2.01	0.26	3.69	6.76	
Pérdidas y/o Ganancias de A	3.67	0.27	0.0	0.13	0.02	0.80	2.99	0.42	0.59	0.20	0.26	0.26	1.51	

OXIDOS LIBRES EN EL SUELO					
Horizonte	Profundidad cm	SiO ₂ (%)	FeO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Relaciones SiO ₂ /Al ₂ O ₃ / SiO ₂ /Fe ₂ O ₃ / FeO ₃ lib/ FeO ₃ total
A	0 - 40	0.26	0.39	0.06	7.24 / 0.66 / 13.83
TA _s	40 - 150	0.27	0.20	0.04	11.33 / 1.32 / 7.57

MINERALOGIA					
Horizonte	Profundidad cm	Minerales cristalinos	Minerales Amorfos	Ferritidita (%)	Al _{ox} +1/2Fe _{ox}
A	0 - 40	Kh, Fd, Qz y CM	Alofano (%)	0.39	0.70
TA _s	40 - 150	Kh, Fd, Qz y CM	1.78	0.17	0.21

Kk: Cadinita Fd: Feldespatos Qz: Cuarzo Kh: Halobisita CM: Interstratificados



E. PERFIL M4

Clasificación propuesta

Soil Taxonomy, 1994: Lithic Ustorthent

FAO- UNESCO, 1990: Regosol Téfrico

Geomorfología: ladera media

Elevación 1770 m.s.n.m.

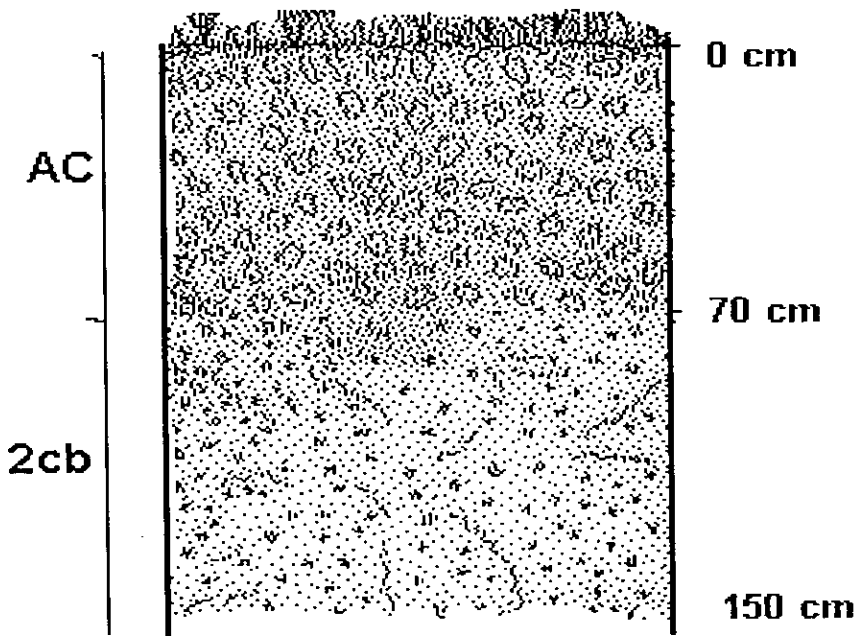


Figura 15. Esquema del Perfil M4

En el perfil M4 se ubicó un horizonte y una capa endurecida como se representan en la Fig. 15, el primero está localizado en la parte superior hasta 70 cm de profundidad, separado en forma plana y clara de la capa subyacente, que se extiende hasta más de los 150 cm de profundidad, diferenciados en campo por su dureza y textura.

El horizonte superficial, posee un color gris muy oscuro, asociado a las características de un horizonte diagnóstico ócrico, su estructura es de bloques subangulares finos y moderadamente desarrollados, consistencia débil y suelta, en seco, adhesiva y muy plástica, en húmedo. Mientras que, la capa subsuperficial, denominado $2C_b$, es de color pardo pálido, estructura granular fina, consistencia suave, tanto en seco como en húmedo, muy adhesiva y plástica, en húmedo (tabla 12a.). Este perfil, aparentemente, no muestra un horizonte claro, desarrollado a partir de la alteración edafocímica de solo material. Lo observado en campo dejar entrever la presencia de dos capas de cenizas depositadas, como una sucesión de dos depósitos de eventos volcánicos progresivos.

La textura en la superficie es franco arcilloso, en la cual sobresale la fracción de arenas finas, que aparentan ser angulares con alta esfericidad, mientras que, la textura hacia la capa subyacente es arcillosa. Esta diferencia textural, es otro indicio de la presencia de dos capas, ya que, en los primeros 70cm no se expresa un cambio secuencial, que permita afirmar, que el horizonte subyacente se trata de acumulación de arcilla por procesos de iluviación. Visto de otra manera, la capa superior, corresponde a una fase de cenizas depositadas, que no han sufrido alteraciones físico-químicas, suficientes para evidenciar cambios morfogenéticos.

En el perfil, tanto la densidad aparente como real, son altas, por lo tanto su porosidad total es muy baja (tabla 12b). Esta propiedad informa sobre la presencia de dos capas compactadas a manera de densipanes, los cuales poseen características semejantes a un fragipán, pero cuyo proceso de compactación esta relacionado con mecanismos de consolidación recientes.

De acuerdo a los análisis químicos, la capa superficial posee pH neutro, mientras que, la capa subyacente es alcalina (tabla 12c), es decir que las condiciones de alteración de la capa superficial de los dos materiales son diferentes. El pH alcalino de la capa $2C_b$, posiblemente se generó por la acumulación de bases bajo condiciones mas secas, mientras que en la superficie,

además de presentarse actividad de materia orgánica, las condiciones de humedad han sido mayores.

El contenido de materia orgánica en la superficie es mayor que en la capa subyacente. Lo que indica que la superficie está influenciada por procesos de adición de materia orgánica, la cual aporta característica de color más oscuro, así como también la formación de estructura fina. La CICT es media, en ambas capas y la saturación de bases es alta.

El contenido de Ca^{++} y Mg^{++} representan más del 99% de la saturación de bases (tabla 12c.), además en la superficie existe más Ca^{++} intercambiable, que Mg^{++} y en la capa subyacente, la proporción es inversa. Esto quiere decir, que las cenizas depositadas en la superficie poseen mayor contenido de silicatos ricos en calcio.

El análisis de la composición mineralógica (tabla 13), expresa la presencia de dos tipos de cenizas; en la superficie cenizas félsicas de carácter dacítico y en la parte subyacente cenizas intermedias tipo andesítico, por lo tanto, el perfil es el resultado de una discontinuidad litológica, en el cual no se puede referenciar cada sección como horizonte, sino como capas. Sin embargo, la presencia de algunos procesos biogénicos en la superficie, permite decir, que ésta capa está evolucionando hacia un horizonte edafoquénico, el cual se ha clasificado como AC.

Por no existir, la presencia de un horizonte propiamente dicho no se presenta el análisis de pérdida y ganancias de óxidos entre horizontes. Las relaciones de alteración son mayores en la superficie, ya que es un material más reciente, con respecto a la capa subyacente.

En el análisis mineralógico de arcilla se obtiene, en ambas capas, minerales primarios de feldespatos y cuarzo, seguido de minerales secundarios como haloisita 7Å e interstratificados, además, en la capa subsuperficial se identifica la presencia de esmectita (tabla 13.). La fracción no cristalina está constituida por bajos contenidos alofano, imogolita y ferrihidrita.

Los minerales primarios que se identifican, reflejan el bajo nivel de intemperismo químico del material y también el predominio de condiciones en donde han prevalecido altos contenidos de sílice, los cuales limitan la formación de arcillas y favorecen la cristalización del cuarzo. En la capa subsuperficial, ante todo, las condiciones de formación de minerales secundarios, se ha dado bajo soluciones ricas en sílice y bases, principalmente Mg^{++} , que permite la formación de arcillas esmectíticas.

Al establecer una secuencia evolutiva de los perfiles evaluados, se puede decir, que el perfil M4 corresponde en una catena, a la primera fase de formación de un suelo, a partir de cenizas consolidadas, en la cual no se expresan aún, manifestaciones morfológicas en el perfil.

Los primeros rasgos edafogenéticos identificados son los procesos de adición y transformación de la materia orgánica, que brinda al horizonte superficial formación de estructura y cambios físicos en el color, producto de la alteración del vidrio volcánico y la materia orgánica. A nivel químico, se manifiesta la formación de arcilla haloisita mediante mecanismos de alteración de los minerales.

Al igual que en el perfil M3, éste perfil es clasificado taxonómicamente en el orden Entisol, por no poseer horizontes diferenciados o de acumulación, sin embargo, éste también reúne propiedades características de los suelos ándicos, como son el contenido de vidrio volcánico y el contenido de $Al_{ox} + \frac{1}{2}Fe_{ox}$ mayor de 0.65%, que hace pensar sobre la evolución de propiedades vítricas del horizonte.

La resistencia de algunos contenidos significativos de minerales alofánicos, en los perfiles, puede estar asociado a las formas desarrolladas de enlaces orgánicos, asociados a condiciones de concentración de sílice.

Tabla 12a. Caracterización morfológica del Perfil M4

Horizonte	Profundidad cm	MORFOLOGIA										Observaciones
		COLOR		Estructura		Consistencia		Textura		Separación		
		Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco	Mojado	Mojado	Cr	Clara - hz	
AC	0 - 70	10YR 3/2	10YR 6/2	bsa - f - mo	fr	d	a/imp	Cr	Clara - hz			
		Gris muy oscuro	Pardo									
2C _b	70 - 150	10YR 5/3	10YR 6/3	g - f - S	s	d	ma/p	r				
		Pardo pálido	Pardo									

Tabla 12b. CARACTERISTICAS FISICAS

Hz.	Prof.	Densidad Mg/m ³	Porosi. %	Clase Textural fracción menor de 2mm			Arenas finas (%)					Redondez y Esfericidad							
				Arena (%)	Limo (%)	Arcilla	A	B	C	D	E	B	C	D	E				
				mm	mm	mm													
				0.10-0.05	0.05-0.02	0.005-0.002													
				0.10	0.05	0.005													
AC	0 - 70	1.90	28.30	0.64	8.47	11.46	12.93	9.57	5.73	13.08	4.72	33.42	32.2	48.3	19.2	15	53.8	30.7	
2C _b	70 - 150	1.91	27.92	2.53	1.49	1.44	2.66	4.15	3.21	22.44	8.72	53.38	12.8	56.3	8.6	1.4	23	38.4	36.3

Tabla 12c. CARACTERISTICAS QUIMICAS

Hz.	Prof.	pH	M.O	C.I.C.T.	Bases Intercambiables cmol/Kg	Σ Bases	Sat. Base	P. aprov.	Relaciones				
									(Ca+Mg)/K	Ca/Mg	K/Ca		
		1:2.5	1:2.5										
		H ₂ O	ApH	%	cmol/Kg	Na	K	Ca	Mg	cmol/Kg	%		
AC	0 - 70	6.80	5.20	1.60	2.18	21.80	0.13	0.72	10.0	6.0	16.85	77.27	1.20
													18.37
													1.67
													0.07
													0.03
2C _b	70 - 150	8.10	6.10	2.00	0.14	24.30	0.53	2.27	8.0	11.0	23.29	89.71	1.20
													12.85
													0.73
													0.28
													0.09

r: Arcilloso
Cr: Franco arcillosos

Mp: Muy plástico
A: Adhesivo

S: suelto
d: Débil
C: Subangulosos
D: Subredondeado
E: Redondeado

Tabla 13. Composición química elemental y mineralogía del Perfil M4

OXIDOS TOTALES EN EL SUELO TOTAL																	
Horiz.	Prof.	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	Relaciones			
	cm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	Total	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	SiO ₂ / Fe ₂ O ₃	
AC	0 - 70	63.99	2.45	16.28	3.24	0.08	3.22	5.27	3.37	1.71	0.25	3.26	6.64	109.76	6.67	69.42	6.09
2C _b	70 - 150	59.63	3.34	19.0	3.23	0.04	1.15	2.85	1.08	2.52	0.09	8.48	8.14	109.54	5.33	47.45	4.79
OXIDOS LIBRES EN EL SUELO TOTAL																	
Horizonte	Profundidad cm	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃		Relaciones		Fe ₂ O ₃ Libre/ Fe ₂ O ₃ total								
AC	0 - 70	0.23	0.38	0.05	8.27	0.62	15.51										
2C _b	70 - 150	0.36	0.17	0.05	13.13	2.08	5.12										
MINERALOGIA DE LA FRACCION ARCILLA																	
Horizonte	Profundidad cm	Minerales cristalinos		Minerales Amorfos		Fermhidrita (%)		Al _{ox} +1/2Fe _{ox}									
AC	0 - 70	Kh, Fd, Qz, y CM	1.99	0.52	0.76												
2C _b	70 - 150	Fd, Kh, Kk, Et y CM	2.07	0.05	0.15												
Kk: Caolinita	Fd: Feldespatos	Qz: Cuarzo	Kh: Halosita	Kk: Interstratificados	CM: Interstratificados												

F. PERFIL M4A**Clasificación propuesta**

Soil Taxonomy, 1994: Typic Haplustalf

FAO- UNESCO, 1990: Luvisol Haplico

Geomorfología: ladera media

Elevación 1800 m.s.n.m.

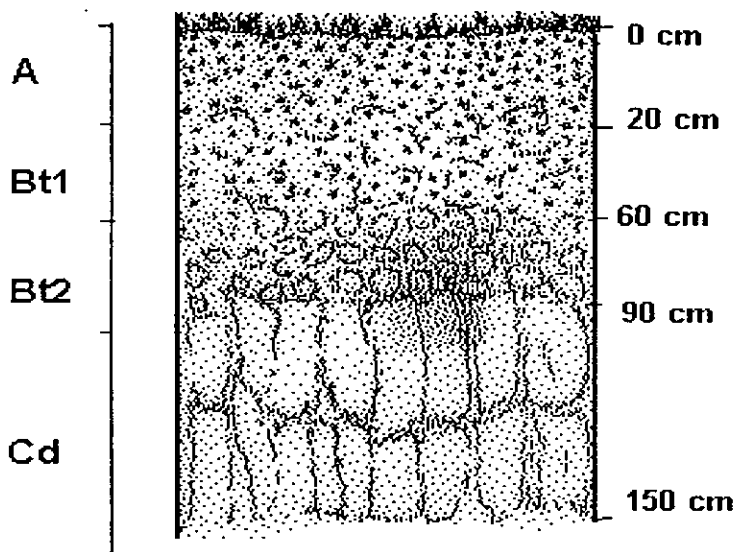


Figura 16. Esquema del Perfil M4A

El perfil M4A presenta cuatro horizontes, como se representa en el esquema de la Fig. 16. En la superficie se ubica un horizonte de diagnóstico mólico de 20 cm de espesor, separado en forma plana y difusa, de una horizonte B_{1t}, con 40 cm de espesor, separado claramente del siguiente horizonte B_{2t}, el cual se diferencia, principalmente, por el cambio en el color y la textura, y cuyo espesor es 30 cm. Hacia abajo se encuentra un horizonte C_d, ligeramente duro, de color más pálido que el anterior y se extiende desde los 90 cm hasta más de 150. A través del perfil se encuentran gravas y gravillas en un 30% de proporción.

El horizonte A, es de color pardo grisáceo en seco y húmedo, estructura granular fina de moderado desarrollo, consistencia suelta, tanto en húmedo como en seco, además es adhesiva y plástica. El horizonte B₁₁ tiene el mismo color del horizonte anterior, posee una estructura granular fina, muy desarrollada, de consistencia friable y suelta, no adhesiva y muy plástica. El horizonte B₂ presenta una mezcla de color, entre pardo grisáceo y pardo en seco, estructura de bloques subangulares medios, moderadamente desarrollados, consistencia friable y dura, no adhesiva y plástica. Finalmente, el horizonte C₀, está ubicado a partir de los 90 cm de profundidad, es de color pardo muy pálido en seco, estructura masiva débil, consistencia friable y muy débil, adhesiva y no plástica (tabla 14a).

El desarrollo morfológico de éste perfil expresa diferentes mecanismos de alteración y transformación del material parental, que se expresan en el desarrollo de características físicas particulares como son, estructuras y colores que permiten establecer cambios morfológicos marcados entre los horizontes, además existen procesos de horizonación claros.

La textura en el horizonte A es franca arenosa, con predominio de arena fina en la fracción gruesa, de apariencia angulosa. En el horizonte B₁₁ la textura es franca, en la cual sobresale el contenido de limo grueso, de aspecto anguloso y alta esfericidad. El siguiente horizonte B₂ es de textura franco arcillo arenosa, con mayor presencia de arena media, de forma angular. En el último horizonte la textura es franca arenosa, también con predominio de arenas medias, que vistas bajo el microscopio son angulosas (tabla 14b).

La anterior descripción, prueba de otra manera, los procesos evolutivos del perfil, en el cual, se lleva a cabo procesos de transformación como son eluviación e iluviación de arcilla, posibilitando la formación de los horizontes B₁₁ y B₂. Por otro lado, la forma angular de las partículas gruesas, prevaletentes a lo largo del perfil, se refiere en primera instancia a los mecanismos de depósito de material, antes mencionado, y también a la alteración *in situ* de esta fracción.

La densidad aparente en el horizonte A es relativamente baja y por lo tanto, su porosidad es alta, hacia los horizontes subyacentes, la densidad aparente y real aumentan en diferente proporción, expresando disminución de la porosidad total (tabla 14b). Esta propiedad manifiesta procesos de reorganización de las partículas, en la cual impera, el papel de la materia orgánica en los mecanismos de estructuración del material, que está expresado fuertemente en el horizonte A, así como también, el papel de la arcilla en procesos de compactación como se observa en el horizonte B₂. Finalmente, el último horizonte, denominado C_d, ya que posee mayor densidad aparente y menor porosidad, asociado a una estructura masiva, como expresión de procesos de compactación del material geológico.

El pH, a lo largo del perfil, es más o menos constante, en un rango cercano a neutro, al igual que la acidez intercambiable, sin embargo, en el horizonte superficial ésta última es mayor, debido a la mayor presencia materia orgánica (tabla 14c). El contenido de materia orgánica, en los horizontes superficiales es alto, y disminuye proporcionalmente en los demás subhorizontes, éste factor tiene influencia sobre otras propiedades, ya que la CICT, aumenta de acuerdo con el contenido de arcilla y la presencia de materia orgánica. El complejo de bases está dominado, por el contenido de Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺, los cuales proporcionan una saturación de bases por encima de 50%, en los horizontes a excepción del horizonte B₁₁, el cual muestra procesos fuertes de desbasificación, mientras que, en el B₂ se acumulan, por efecto de lixiviación de bases desde los horizontes superiores. Las propiedades químicas del perfil ponen de manifiesto procesos fuertes de alteración edafológica, como desbasificación, desvitrificación, eluviación e iluviación de arcillas, que son propiciadas en condiciones ambientales muy húmedas o transformación por tiempos geológicos largos.

La composición mineralógica elemental de los horizontes, representada en los óxidos totales, muestra la presencia de depósitos de cenizas félsicas de carácter dacítico, alteradas mediante diferentes mecanismos geoquímicos. La evolución y formación de los tres horizontes superiores, son el resultado de procesos de alteración edafológica de las cenizas, por razón

procesos generales de formación de un suelo, que se expresan en los valores de pérdidas y ganancias totales (tabla 15a).

Las pérdidas más importantes están representadas en los óxidos de sílice, potasio, fósforo y titanio, debido a los procesos de desilificación y lixiviación de los horizontes superiores. Las pérdidas de titanio, expresan alteración de materiales muy antiguos, ya que éstos son minerales muy resistentes. Las ganancias, de calcio y magnesio, sobre todo en la superficie, pueden estar asociado a mecanismos de acumulación de sales, debido a la presencia de épocas secas prolongadas.

Las relaciones molares de alteración del material parental son más fuertes en los dos horizontes más subyacentes B₂ y C_d, esto puede interpretarse, como la transformación del material en un sentido progresivo, a través de los mecanismos antes expuestos.

La presencia de óxidos libres en los minerales, es semejante con relación a los perfiles previamente analizados, asociados a la riqueza de minerales silicatados. En el horizonte superficial, son evidentes las pérdidas de óxidos de aluminio libre, los cuales, pasan a formar minerales filosilicatados que seguidamente son iluviados a horizontes inferiores (15b).

La fracción arcilla en los horizontes de este perfil esta compuesta por una gran proporción de feldespatos, cuarzo y minerales secundarios como haloisita 7Å, esmectita, caolinita e interestratificados (tabla 15b.). Los compuestos no cristalinos de alofano mas imogolita y ferrihidrita están presentes en proporciones muy bajas, los cuales no brindan al perfil características de un suelo ándico.

La evolución mineralógica de este perfil, muestra, principalmente, condiciones en donde prevalecen altas concentraciones de sílice, por mecanismos de desvitrificación del vidrio volcánico, así como también, condiciones de humedad alternante en un medio bien drenado, que han favorecido la acumulación de bases y lixiviación, para formar arcillas de dos etapas de evolución

diferente, como son caolinitas y esmectitas, además de la formación inicial de haloisita y cristalización de cuarzo.

Las características micromorfológicas del horizonte C_d son: textura franca arenosa. Fábrica compuesta por una estructura de bloques subangulares, microestructura de grano compacto; distribución relacionada entre pedos (c/f), mónica y entre granos porfirica cerrada, b-fábrica de manchas y laminar. Estas características ponen de manifiesto que el material fue depositado vía eólica, el cual fue ligeramente consolidado, ya que la composición es de granos gruesos, a diferencia de las anteriores capas endurecidas.

Los poros observados son de empaquetamiento, tipo cavidad y grieta, en forma ondulada, de tamaño meso y fino, en un 45% de abundancia. Los granos poco orientados son muy rugosos, de tamaño meso y medio. Estos poros testifican sobre la acción mecánica de alteración de las raíces, la acción agregante de los exudados orgánicos, la arcilla y también la acción física de cambios de temperatura.

Los rasgos pedológicos observados son: granos revestidos de arcilla en forma alternada con cuarzo, nódulos de manganeso y presencia de raíces (Fig. 17a). La mineralogía identificada en las láminas delgadas se caracteriza por tener abundante vidrio volcánico alterado, plagioclasas, biotita marrón, minerales opacos (magnetita) (17b). A diferencia de las muestras de los anteriores perfiles, en esta lamina se observan minerales más seleccionados, en donde ya no existe la presencia de anfíboles y piroxenos, ante todo prevalecen el vidrio y las plagioclasas.

Los revestimientos de arcillas sobre los poros informan sobre fenómenos pedológicos relacionados con procesos de translocación como iluviación de arcillas, los nódulos de manganeso están relacionados con la acumulación de los productos de alteración de minerales ferromagnesianos en medios más húmedos.

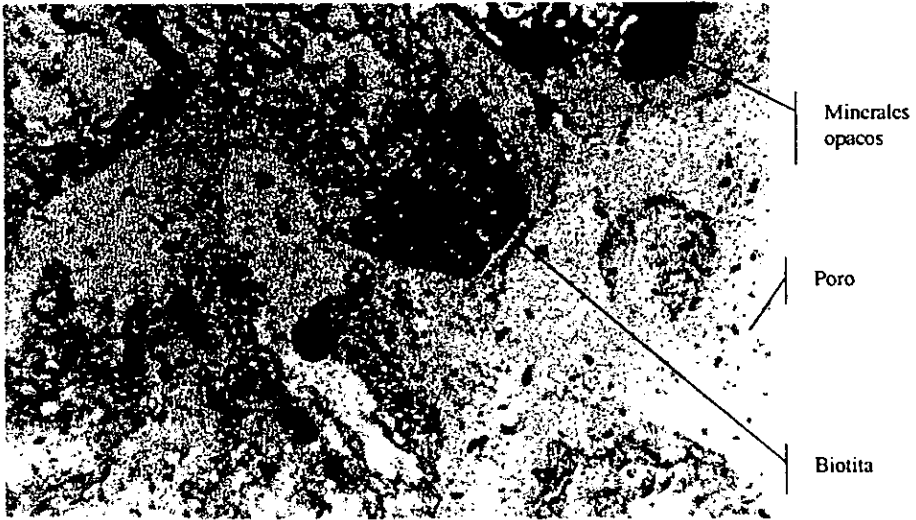


Figura 17a. Bajo luz plana es posible observar algunos minerales opacos, biotita y grandes poros contaminados con impurezas de cenizas. 4X

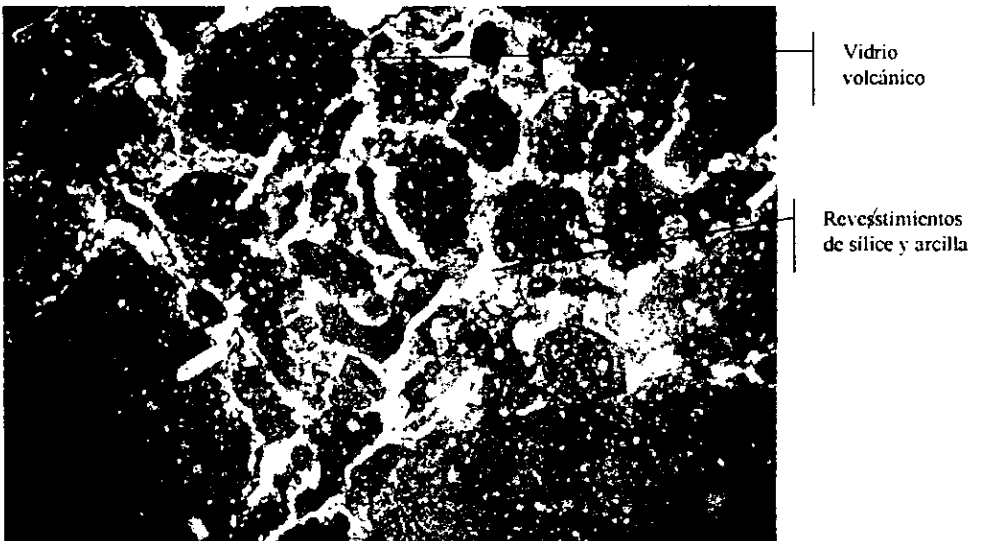


Figura 17b. Las observaciones petrográficas, muestran revestimientos de cuarzo y arcilla sobre los granos, ejerciendo una acción cementante sobre el material, Nicoles cruzados, 4X..

La evolución de este perfil puede describirse a partir de un proceso inicial de depósitos de cenizas poco o no consolidadas, dadas las características gruesas del material. Esta condición inicial permitió, en forma general la evolución y desarrollo del suelo, mediante diferentes mecanismos alteración físico-química.

Los procesos que dieron lugar a las características expresadas son adición de materia orgánica, que permite la transformación morfológica de los horizontes a través de la agregación, y cambios en el color. Otros proceso, que tiene que ver son translocación de arcillas hasta los horizontes B₁₁ y B₂ y la transformación o neogénesis del vidrio volcánico y feldespatos a arcillas, en éstos también los minerales primarios se transforman y transforman, mediante hidrólisis y lixiviación.

A pesar que, algunas características de este perfil son semejantes a los antes evaluados, esto no es suficiente para afirmar que, el suelo proviene de los mismos materiales. El desarrollo del suelo y la formación de perfiles B₁₁ y B₂, involucran un suelo más antiguo, probablemente formado a partir de materiales volcánicos antes depositados (antiguos) y bajo condiciones de alteración muy semejantes. Por las características morfogenéticas y su posición en la geoforma, hace pensar que se trata de un suelo relicto, que no fue sepultado por los últimos depósitos de cenizas, dado que se encuentra mas arriba que los anteriores perfiles. Por lo tanto, el tiempo, las condiciones de alteración y la ausencia de nuevos depósitos en la superficie han permitido un desarrollo progresivo, dando al perfil mayores características edafogénicas. De ahí que, taxonómicamente, sea clasificado en el orden Alfisol.

Tabla 14a. Caracterización del Perfil M4A

Horizonte	Profundidad cm	COLOR		MORFOLOGIA		Textura	Separación	Observaciones
		Húmedo	Seco	Estructura	Consistencia			
A	0-20	10YR 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	10YR 5/2 Pardo grisáceo	g - f - mo	Húmedo: s Seco: alp	C	difusa - hz	Gravas, gravillas en 30% del perfil
B ₁₁	20-60	10YR 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	10YR 5/2 Pardo grisáceo	g - f - S	fr	Cr	clara - hz	
B ₂	60-90	10YR 4/2 Pardo grisáceo oscuro	10YR 5/2 Pardo grisáceo	bsa-m-mo	fr	rl	clara - hz	Moleados oscuros
C ₀	90-150	10YR 6/3 Pardo pálido	10YR 8/3 Pardo muy pálido	P	fr	Ar		

Tabla 14b. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Hz.	Prof.	Densidad Mg/m ³	Porosi.	Clase Textural fracción menor de 2mm		Redondez y Esterilidad																
				Avena (%)	Limo (%)	Arcilla	Arenas finas (%)					Limos medios (%)										
cm	Apare	Real	%	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.10	0.10-0.05	0.05-0.02	0.02-0.005	mm	mm	A	B	C	D	E	B	C	D	E	
A	0-20	0.94	2.15	64.53	5.14	13.1	12.3	13.6	13.4	15.6	0.74	1.28	17.94	24.6	50.5	26.9				20	60	20
B ₁₁	20-60	1.55	2.19	41.51	2.07	5.95	8.37	11.1	9.38	15.9	11.3	1.08	34.78	17.7	42.3	23.9	8.6	0.05	30	20	30	20
B ₂	60-90	1.43	2.22	46.04	1.84	8.11	7.32	7.01	5.92	2.25	1.53	2.04	50.26	48.9	30.9	37.1	4		8.3	75	16.6	
C ₀	90-150	1.56	1.99	41.13	5.65	26.8	17.1	10.7	9.45	3.58	0.74	1.28	17.9	18	65.1	16.8			20	60	20	

Tabla 14c. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Prof.	PH	M.O	C.I.C.T.	Bases Intercambiables				Σ Bases	Sal. Base	P. aprov.	Relaciones					
				cmol ⁺ /kg	Na	K	Ca				(Ca+Mg)/K	Ca/Mg	K/Ca	PKI		
cm	1:2.5	H ₂ O	KCl	dpH	cmol ⁺ /kg	mmol/kg	mmol/kg	mmol/kg	ppm							
A	0-20	7.15	5.30	1.85	4.49	29.0	0.09	1.20	10.0	23.29	80.3	1.02	20.31	1.20	0.10	0.04
B ₁₁	20-60	6.90	5.50	1.40	30.6	37.0	0.09	1.13	13.0	4.0	18.21	1.02	16.55	3.25	0.09	0.03
B ₂	60-90	7.15	5.40	1.75	1.56	23.0	0.14	1.54	15.0	9.0	25.68	1.05	20.86	1.67	0.10	0.07
C ₀	90-150	7.25	5.70	1.55	0.95	23.7	0.14	1.51	13.0	2.0	16.66	1.02	14.32	6.50	0.12	0.06

bsa: Bloques subangulares f: Fino m: Masiva g: Grioso S: suelto p: Plástico P: Prismático Ar: Arenoso arcilloso ri: arcillo limoso

Tabla 15a. Oxidos Totales y Libres en el suelo

OXIDOS TOTALES EN EL SUELO TOTAL																
Prof.	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁻	H ₂ O	Relaciones			
Horiz.	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	Total	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	SiO ₂ / Fe ₂ O ₃	SiO ₂ / R ₂ O ₃
A	62.97	1.91	13.82	3.23	0.05	2.07	2.92	1.18	2.97	0.29	3.31	9.68	104.3	7.73	87.62	7.11
B ₁₁	64.81	1.97	15.11	3.19	0.04	2.24	3.38	3.37	2.99	0.13	3.42	7.46	108.1	7.28	87.4	6.72
B ₂	63.78	1.94	16.43	3.21	0.02	1.26	2.62	2.02	3.52	0.23	6.11	8.15	109.2	6.59	87.3	6.13
C _d	68.79	1.28	13.94	3.21	0.03	1.04	1.92	2.02	5.03	0.20	3.39	5.55	106.4	4.93	142.8	6.21
B ₁ K de Al ₂ O ₃	54.11	1.65	13.94	2.72	0.02	1.07	2.22	1.71	2.99	0.20	5.18	6.91	92.73			
B ₁ K de Al ₂ O ₃	59.79	3.92	13.94	2.94	0.04	2.07	3.12	3.11	2.76	0.12	3.16	6.88	101.8			
A ₁ K de Al ₂ O ₃	63.52	3.80	13.94	3.26	0.05	2.09	2.95	1.19	3.0	0.29	3.34	9.76	107.1			
Pérdidas y/o Ganancias de B ₂	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+				
Pérdidas y/o Ganancias de B ₁₁	14.68	0.36	0.0	0.49	0.01	0.03	0.30	0.30	2.04	0.0	1.79	1.36				
Pérdidas y/o Ganancias de B ₁	-	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	+				
Pérdidas y/o Ganancias de A	9.0	2.64	0.0	0.27	0.01	1.20	1.19	1.08	2.27	0.08	0.23	1.33				
	-	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	+				
	5.27	2.52	0.0	0.05	0.02	1.05	1.02	0.83	2.03	0.09	0.05	4.21				

Tabla 15b. Oxidos Libres En El Suelo Total

Horizonte	Profundidad cm	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Relaciones		
					SiO ₂ /Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Fe ₂ O ₃	
A	0-20	0.27	0.17	0.02	19.09	1.64	8.64
B ₁₁	20-60	0.26	0.18	0.05	8.42	1.42	9.24
B ₁₂	60-90	0.31	0.11	0.06	8.38	2.96	5.41
C _d	90-150	0.24	0.08	0.03	12.92	2.95	6.25

MINERALOGIA DE LA FRACCION ARCILLA

Horizonte	Profundidad cm	Minerales cristalinos	Minerales Amorfos	Alofano (%)	Ferrhidrita (%)	Al _{ox} +1/2Fe _{ox}
A	0-20	Fd, Kh, Qz, Et y CM	Ferrhidrita	1.92	0.59	0.71
B ₁₁	20-60	Fd, Kh, KK, Et y CM	Ferrhidrita	1.85	0.18	0.32
B ₁₂	60-90	Kh, Fd, Et, CM, Kk y Qz	Ferrhidrita	1.99	0.17	0.37
C _d	90-150	Kh, Fd, Kk, Et y CM	Ferrhidrita	2.35	0.06	0.27

Kk: Caolinita Fd: Feldespatos Qz: Cuarzo Kh: Halosita CM: Interstratificados Et: Esmectita



3. Propiedad mecánica y química del material endurecido en los perfiles

A. Resistencia a compresión simple.

Las medidas de resistencia a compresión simple se llevaron a cabo sólo en las capas endurecidas, sobre núcleos labrados en material inalterado, secos al aire, con contenidos de húmeda, entre 8 y 10%, cuyos resultados se muestran en la tabla 15.

Tabla 16. - Resistencia a compresión simple

PERFIL	HORIZONTE	PROFUNDIDAD	RESISTENCIA kg./cm ²
M1	T _{As}	20 - 150	17.9
M2	T _{As}	0 - 50	57.9
M3	T _{As}	40 - 150	22.5
M1A	T _{As}	32 - 150	19.2
M4A	C _d	90 - 150	4.9

De acuerdo con la tabla anterior y a la Fig. 18 el material de la capa, en el perfil M4A, es de baja resistencia, bajo endurecimiento y se deforma sin estallar, las capas de los perfiles M1, M1A y M3 son de resistencia media y tienen un rango amplio para la deformación, mientras que, en el perfil M2, el material es muy duro y estalla para deformarse. En el comportamiento mecánico de estos materiales, existe una tendencia promedia, establecida por los materiales de los perfiles M1, M1A, M3, que son semejantes a los tepetates identificados en México, que se encuentran cementados por sílice, con diferente nivel de dureza, posiblemente por el grado de cementación (Quantín *et al.*, 1993).

Particularmente, la capa endurecida, ubicada en la superficie, del perfil M2, es la que posee mayor endurecimiento, esto coincide con lo propuesto por Arias, *et al.*, 1992 y Campos, *et al.*, 1990, el cual afirma que los tepetates, una vez expuesto a la intemperie, aumenta su nivel de dureza. Por otro lado, en el perfil M4A se identifica un material frágil semejante a varios de los fragipanes descritos en México, sin embargo, esta condición no determina necesariamente el carácter de evolución genético de éstos horizontes.

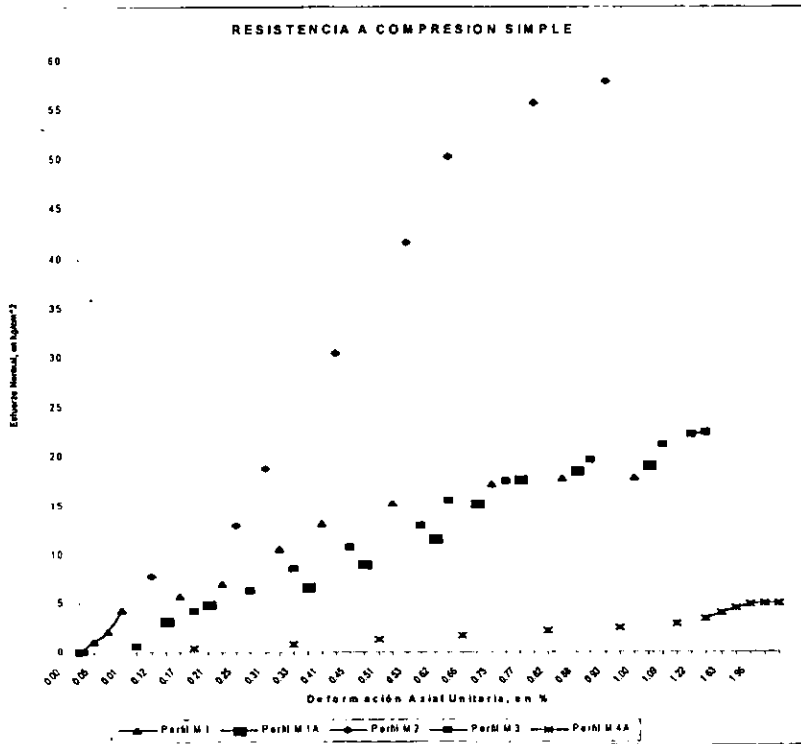


Figura. 18. Resistencia a compresión simple de las capas endurecidas.

Esta propiedad mecánica, no establece por sí sola, una correspondencia con horizontes o capas endurecidas en forma general, ya que, debe asociarse otras propiedades químicas, como las características y proporciones del agente cementante, así como también, el origen y dinámica de la formación. Es decir que deben poseer otras características para que puedan ser identificadas como tal.

B. Prueba de Estabilidad de los cementantes.

Para evaluar esta propiedad se sometieron fragmentos inalterados de las capas endurecidas, a tratamientos de agua destilada, HCl 1N y HCl y KOH concentrado, en forma alternada. Los resultados cualitativos se muestran a continuación:

Tabla 17.- Prueba de estabilidad de los cementantes

PERFIL	HORIZONTE	PROFUNDIDAD	REACCIÓN EN AGUA	REACCIÓN EN HCL 1N	REACCIÓN EN HCL Y KOH ALTERNADOS
M1	T _{AS}	20 - 150	*	Leve reacción	Se reblandeció**
M2	T _{AS}	0 - 50	*	No reaccionó	Muy poca reacción**
M3	T _{AS}	40 - 150	*	Leve reacción	Se reblandeció**
M1A	T _{AS}	32 - 150	*	Leve reacción	Disgregación completa
M4A	C _d	90 - 150	Disgregación completa en 20 seg.	No reaccionó	

* No sufrieron alteración

** Después de 24 horas de tratamiento

Los resultados de esta prueba corresponden a otro criterio para la identificación de horizontes diagnóstico fragipán y duripán, y de acuerdo a lo expuesto en la tabla 17, los materiales endurecidos se puedan clasificar en tres grupos, cuya correspondencia con los tepetates está establecida paralelamente:

- Materiales frágiles: Asociados a tepetates con ligera o nula presencia de agentes cementantes y resistencia a la compresión baja, menor de 5Kg/cm².
- Materiales ligeramente duros: En los tratamientos químicos se asemejan a tepetates que parecen estar cementados por sílice, su resistencia a la compresión está entre 17 y 23 Kg/cm².
- Materiales duros y muy duros: En los tratamientos químicos se comportan como duripanes fuertemente cementados por sílice, cuya resistencia a la compresión supera los 50 Kg/cm².

Estos materiales en seco son muy duros, sin embargo el primer y segundo grupo muestran diferentes niveles de friabilidad en húmedo, por esto se puede decir que el grado de cementación es diferente.

Este segundo criterio pone de manifiesto, que los materiales de los perfiles M1, M1A, M2 y M3, se comportan desde el punto de vista químico, como capas cementados por sílice, con diferente nivel de su acción cementante, mientras que, en el perfil M4A, el horizonte endurecido puede asociarse a cualquier horizonte compactado.

C. Microanálisis químico del material cementante

El análisis del material cementante, expresa la composición química del material que aparece uniendo las partículas gruesas y finas en las capas endurecidas, como resultado de los

procesos de alteración pedoquímica del material parental y determinado a través del microscopio electrónico de barrido (MEB) en láminas delgadas, en las cuales se reporta la composición promedio de un número de puntos de muestreo, observadas en las figuras 19, 20, 21, 22 y 23.

Tabla 18. Composición química del material cementante

Perfil Horizonte Observación	M1		M1A		M3			M2		M4A			
	TAS		TAS		TAS			TAS		Cd			
	1 %	1 %	2 %	1 %	2 %	3 %	1 %	2 %	1 %	2 %	3 %	4 %	
SiO ₂	56.07	91.86	64.07	72.08	46.53	79.00	98.52	97.37	61.12	90.77	75.26	78.07	
TiO ₂	0.58	0.00	0.76	0.82	0.50	0.30	0.04	0.02	1.22	0.29	0.53	0.06	
Al ₂ O ₃	27.66	4.08	27.19	23.59	23.51	12.69	0.66	0.78	23.44	5.32	15.40	12.73	
FeO	4.83	0.45	4.77	0.00	4.13	0.39	0.09	0.31	10.31	1.78	1.91	0.76	
MgO	4.64	1.75	1.57	1.79	3.97	0.50	0.08	0.71	1.84	0.61	0.64	0.28	
MnO	0.06	0.00	0.06	0.00	0.05	0.03	0.00	0.12	0.11	0.08	0.0	0.02	
CaO	2.74	0.62	0.39	0.00	2.35	0.61	0.00	0.00	0.72	0.36	0.56	0.43	
Na ₂ O	3.02	1.06	0.67	1.01	2.61	3.15	0.61	0.28	0.24	0.51	1.01	1.74	
K ₂ O	0.40	0.18	0.54	0.70	0.34	2.85	0.00	0.00	0.81	0.25	4.59	5.32	

En la tabla anterior, se observa de manera cuantitativa la composición del material cementante de las capas endurecidas, el cual consiste principalmente de óxidos de sílice, seguido en importancia los óxidos de aluminio y finalmente hierro y magnesio, los demás compuestos se encuentran en muy bajas proporciones.

A partir de los resultados de este análisis y las observaciones micromorfológicas y submicroscópicas, es posible confirmar la acción cementante de algunos productos de alteración pedoquímica. Los más representativos son: cuarzo, sílice amorfa, arcillas silicatadas neoformadas y también óxidos de hierro y magnesio, producto de la alteración de minerales ferromagnesianos. La presencia de éstos minerales representan las manifestaciones pedogenéticas que cementan de forma secundaria el material, ya que, en todos los casos, en endurecimiento se debe principalmente a la consolidación inicial.



La fotomicrografía del perfil M1, Fig. 19, muestra en forma general y debido a su escala de observación la existencia recubrimientos sobre los granos, de cuarzo cristalizado, el cual representa el agente principal de cementación del perfil, seguramente, pueda existir sílice en forma de gel, y minerales de arcillas, que acompaña esta acción, ya que la composición química, presenta alto contenido de óxidos de sílice y aluminio. La fotografía evidencia, procesos de alteración *in situ* del material, ya que no se observan marcas de transporte de flujos.



Figura 19. La fotomicrografía del perfil M1 se observa la matriz compuesta por material fino y arcilla cementando los granos, además recubrimientos de éstos por cementante, posiblemente arcilla neoformada y cuarzo. 000.1:10.000X

En las figuras 20 y 21, se observa claramente los recubrimientos laminares de mezclas de arcilla y sílice, expresando translocación y acumulación. Miehlich; Oleschko *et al*, e Hidalgo; citados por Poetsch y Arikas, 1996, encontraron en varios horizontes y materiales geológicos endurecidos, la acción combinada de arcillas haloisitas y gels de sílice ejerciendo la cementación. Estos autores (*op cit.*), en estudios comparativos de tepetates de México, establecieron que las formas de sílice más frecuentes corresponden a ópalo no biogénico, identificado por las formas cóncavo/convexo que asumen en combinación con cutánes de arcilla, esto causado por los movimientos de gels de sílice en condiciones de sequía y humedad.

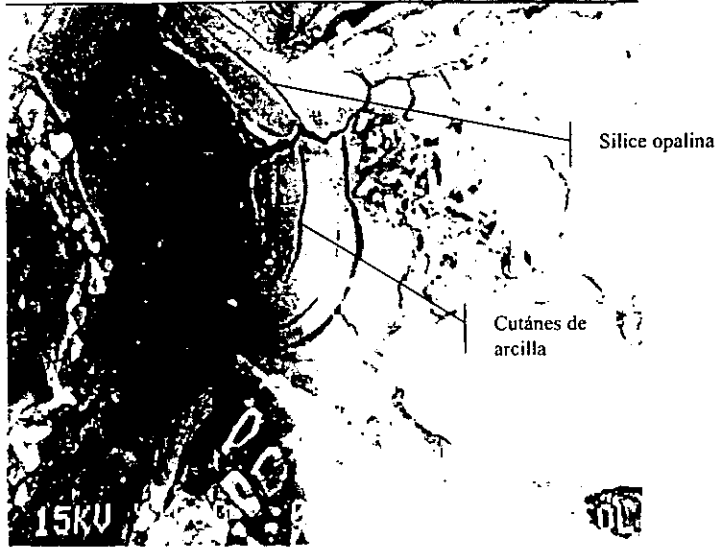


Figura 20. En el perfil M1A, se observa principalmente cutánes de arcillas, combinada con formas de sílice opalina. También vidrio criptocristalino formando parte de la matriz. 0.001: 10.000X

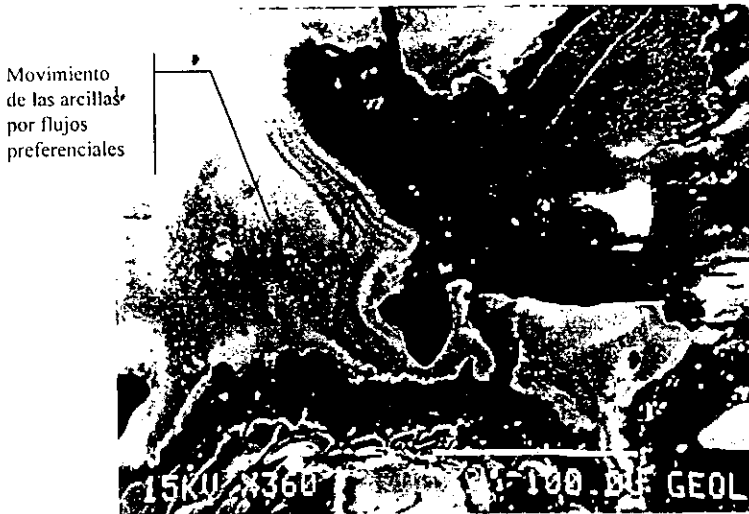


Figura 21 En este material es evidente la acción cementante de mezcla de arcilla y sílice, que recubren los granos de vidrio y feldspatos. 0.001: 10.000X

Las fisuras al interior del cementante muestran el efecto de los ciclos de humedecimiento y secado, por efecto del clima. La composición química de este cementante, esta asociado a arcilla silicatadas, sílice, y también a productos de alteración de minerales ferromagnesianos, observados mas claramente en el ámbito petrográfico.

En el horizonte superficial del perfil M2, Fig. 22, se observa mayor empaquetamiento de los granos y sobre ellos recubrimientos de cementantes, con apariencia de sílice amorfa la cual además de recubrir y empaquetar los granos, rellena el espacio poroso. La composición química del cementante está representada por sílice muy puro. Esta información concuerda con las resultados y características expuestas en esta capa.



Figura 22 En el perfil M2, se observa gran el cementante rodeando y mezclándose con la matriz fina del material.

Como podría esperarse, de acuerdo a lo expuesto anteriormente, alrededor del horizonte C_d del perfil M4A, en la microfotografía de la Fig. 19, se identifican granos gruesos de vidrio volcánico recubiertos con películas de arcilla, y entre los poros pequeñas partículas de impurezas de vidrio, al igual que arcilla. En la fotografía también se identifica partículas de micas.



Figura 23 La microfotografía del perfil M4A, expone un material con granos gruesos, recubiertos en sus bordes por arcilla, también se muestran partículas de micas, que abundan en la muestra. 000.5:100.00X.

Las observaciones anteriores, constatan sobre el papel que ejercen algunos elementos sobre la cementación secundaria del material, en los cuales, quedan involucrados directamente: los productos de alteración del vidrio volcánico en compuestos de sílice, las arcillas, los óxidos de hierro y magnesio, que abundan en la solución, dado que la consolidación inicial del material ha limitado el movimiento de flujos y por lo tanto el desarrollo de los suelos. Esto pone de manifiesto que, la combinación de procesos (geológicos y pedológicos) y de agentes cementantes, genera materiales endurecidos, con características semejantes a un duripán.

Las características pedológicas que se observan, señalan que existe alteración del material original, sin embargo la construcción retrasa del perfil, limita la formación de un horizonte en la parte superior de la toba. Probablemente, y más a largo tiempo que los materiales no consolidados, se podría formar un horizonte endurecidos propiamente dicho, cementado por arcillas principalmente, con mezclas de sílice opalina y de hierro, semejantes en características físicas a los horizontes duripanes. Por el momento, sólo se tiene una toba alterada, con cementada.



4. Desarrollo de los perfiles

Este factor es analizado a partir del Índice de Desarrollo del Perfil (IDP), el cual evalúa las características morfológicas cualitativas, por medios cuantitativos y cuyo valor se estima por el método propuesto por Harden y Taylor, recopilado por Birkeland *et al.* (1990).

Los autores consideran las características identificadas en campo como el color, textura, estructura, consistencia, películas de arcilla, pH entre otras, para evaluar el Índice de Desarrollo de Perfil o del Horizonte (IDH). Señalan que los índices varían entre 0 y 1. El Cero (0) está asociado a suelos jóvenes y el uno (1) a suelos fuertemente desarrollados. En este caso, y de manera conveniente, se propone la siguiente clasificación para llevar a cabo el análisis:

Tabla 19.- Clasificación del Índice de desarrollo del perfil

IDP	CLASIFICACIÓN
0 - 0.2	Suelos muy jóvenes
0.2 - 0.4	Suelos jóvenes
0.4 - 0.6	Suelos desarrollados
0.6 - 0.8	Suelos muy desarrollados
0.8 - 1.0	Suelos fuertemente desarrollados

La tabla 19. muestra los valores de IDH y IDP calculados para las características determinadas en campo de los perfiles. Dado que los perfiles M2 y M4 no son de desarrollo *in situ* no es posible evaluar su IDP. El procedimiento se presenta en el anexo. 1.

En la tabla anterior, se observan dos aspectos; primero, el IDP para todos los perfiles es muy bajo, principalmente el de los perfiles M1 y M1A, asociados a suelos de desarrollo muy incipiente, muy jóvenes (tabla 4.). Segundo, los IDH son mayores al IDP, en los perfiles que poseen más de un horizonte, además se obtiene mayor IDH en el horizonte más profundo, este comportamiento expresa mas alteración del material parental, es decir, los cambios morfológicos más importantes se presentan en este material.

Los valores de índice de desarrollo del perfil, expresan principalmente fases iniciales de alteración y transformación física del material, que se manifiestan a través de cambios en el color y



estructura, muy semejantes en los horizontes A, ya que las condiciones de alteración del material lo son.

Tabla 20.- Índice de Desarrollo del Perfil y del Horizonte (IDP e IDH)

PERFIL	IDH	IDP
M1	$A/T_{AS} = 0.39$	$A/T_{AS} = 0.15$
M1A	$A/AC = 0.34$ $AC/T_{AS} = 0.40$	$A/T_{AS} = 0.18$
M2	$T_{AS}/A_b = 0.57$ $A_b/2C = 0.40$	
M3	$A/T_{AS} = 0.35$	$A/T_{AS} = 0.20$
M4	$A/C = 0.39$	
M4A	$A/B_{11} = 0.16$ $B_{11}/B_{12} = 0.25$ $B_{12}/C_d = 0.24$	$A/C_d = 0.19$

Se podría anotar que, a pesar que, los suelos se han desarrollado a partir de cenizas volcánicas, consideradas como materiales fácilmente alterables, en este caso, la evolución de los suelos ha estado limitada por la consolidación inicial de ellas, y también las condiciones ambientales de periodos húmedos y secos, que han permitido conservar su endurecimiento.

Por otro lado, de acorde con los índices de desarrollo de los perfiles y las expresiones morfológicas, se pueden establecer una catena evolutiva de una suelos, a partir de una toba consolidada bajo condiciones subhúmedas en ésta zona, las cuales pueden ser en el siguiente orden:

$$M4 < M1 < M3 < M1A < M2.$$

El perfil M4A no está considerado en esta catena, ya que, el material inicialmente depositado no presentó consolidación, debido al tamaño de las partículas y naturaleza de material,

las cuales pueden corresponder a depósitos de lapilli. La lluvia de lapilli se refiere a partículas gruesas que expulsa primero un foco volcánico, en este caso de tipo andesítico y que por su peso se desplazan hacia las partes bajas. De ahí que la evolución, tenga considerados otros procesos que han generado mas desarrollo del suelo.

La posición en la geofoma entre los perfiles M4 y M4A, localizados en una sola catena, establecen una secuencia de depósitos diferentes, dadas las características del material y su naturaleza química. En este sector se considera están presentes en la parte inferior una capa andesítica, posiblemente emitido en una fase volcánica anterior, de acuerdo con Murcia y Cepeda, corresponden a liticos herométricos en una matriz arenosa, de composición andesítica, de la actividad del Plio-Cuaternario. Mientras que la capa superior, corresponde a depósitos piroclásticos provenientes de otro foco volcánico, de composición dacítica, de edad cuaternaria, Holoceno-Reciente. Esta secuencia se esquematiza en la Fig. 24.

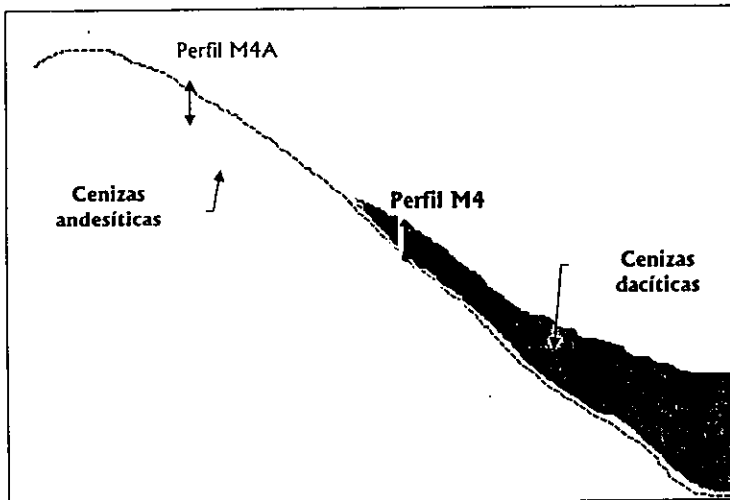


Fig. 24. Esquema de secuencia de depósitos de las cenizas, identificados entre los perfiles M4 y M4A.

Aunada a ésta información, en las observaciones micromorfológicas y petrográficas, se anotó que las características son diferentes a los demás perfiles, lo que permite afirma que el perfil

M4A, corresponde a un suelo relicto, perteneciente a un paisaje antes existente, y el cual no fue sepultado, dada su posición en la geoforma. De ahí, que gracias a la temporalidad, el suelo posee mas desarrollo y evolución.

De otra manera, las evidencias geoquímicas de material, expresadas en la ganancia de óxidos totales, en el horizonte superficial, se relaciona con procesos policíclicos de formación de suelo, en donde se presenta procesos de rejuvenecimiento por lluvias de cenizas transportadas por el aire o por depósitos por efecto de gravedad.

Esta situación particular, en éstos suelos, hace pensar que la aplicación de un análisis del índice de desarrollo del perfil, no es conveniente aplicarla, ya que, la evolución del suelo bajo un concepto de construcción retrasada, retardan o simplifica el desarrollo de los horizontes en una dirección regresiva y en algunos casos los horizontes superficiales han sido decapitados por procesos erosivos. En estos casos las evidencias de alteración no representan desarrollo externo del perfil.

5. Clasificación de los perfiles

De acuerdo a los criterios y jerarquías establecidas por la Soil Taxonomy (op cit.), se realizó la clasificación de los perfiles, correlacionada respectivamente con la clasificación de la FAO- UNESCO. El estudio centra e integra el Orden, Suborden, Gran grupo y Subgrupo de la clasificación americana , la cual se fundamenta en criterios evolutivos, morfológicos, físico-químicos y regimenes de humedad y temperatura.

Los suelos de los perfiles M1, M1A, M2, M3 y M4, se ubicaron en el orden Entisol, todos, clasificados como Lithic Usthorents, ya que, son suelos que morfológicamente solo muestran un horizonte ócrico sobre un horizonte C alterado (toba), dominado por procesos erosivos que limitan la formación un horizonte cambico.

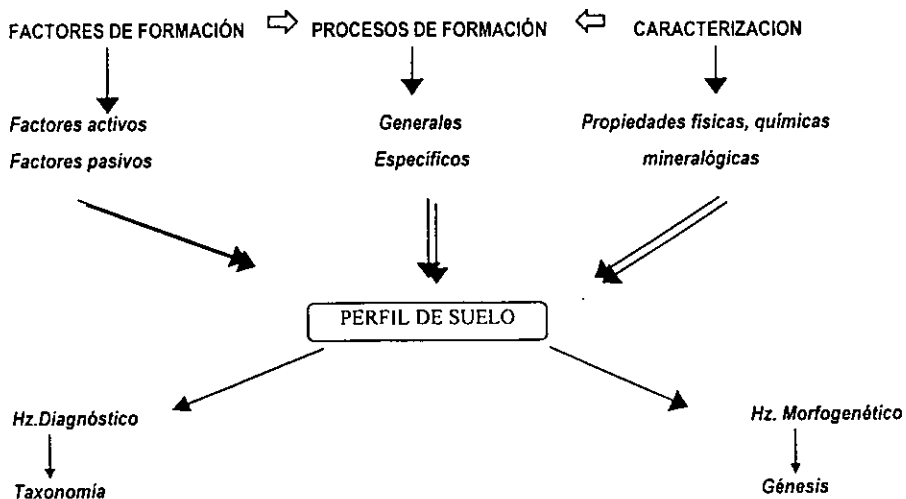
Sin embargo, como se describió y discutió anteriormente, éstos suelos también están dominados por procesos de ganancia de nuevos materiales geológicos por depósitos de cenizas,

produciendo mezclas y simplificación de horizontes. De tal manera, que la formación de un horizontes sea enmascarado y el umbral de formación externa se pierda. De ahí que, gracias a las evidencias químicas de alteración y simplificación de los minerales, se consideren éstos suelos en un intergrado Entisol- Inceptisol. Considerando, en los perfiles M1 y M1A el intergrado Lithic Usthorrents - Typic Ustocrept y en los perfiles M3 y M4, Intergrado Lithic usthorrents - Vitrand Ustocrept. El Perfil M4A, como ya se anotó, corresponde a suelo relicto, el cual posee mayor evolución, por lo tanto fue clasificado como Typic Haplustalf.

6. Génesis de los suelos y horizontes endurecidos

A. Evolución de los suelos

Para establecer cualquier hipótesis o aseveración alrededor de la génesis de un suelo, es necesario establecer criterios o modelos que permitan concluir ideas y conceptos correlacionados entre la génesis y los factores formadores del suelo, es así, que el modelo utilizado en este estudio, considera los siguientes aspectos:



Fuente: Malagón, Comunicación escrita, 1996



Los horizontes morfogénéticos expresados en los perfiles estudiados, imponen muchos rasgos heredados del material parental. En primera instancia, el proceso más importante son los aportes o adiciones de depósitos vulcano-sedimentarios, consolidados mediante procesos diagénéticos, que imponen el carácter endurecido de la capa subyacente. Otro proceso de ganancia, se define a partir de la adición de materia orgánica, lo cual brinda característica de baja fertilidad y poca agregación, ya que las condiciones de alteración no permiten su transformación rápida, éstos junto con otros procesos de alteración favorecen la formación de un epipedón ócrico de poco espesor.

Una siguiente fase en los procesos de formación, tiene que ver con la translocación y transformación de minerales primarios dentro del cuerpo del suelo, que permiten la formación y diferenciación de los horizontes A. En los procesos de transformación intervienen la hidrólisis del vidrio volcánica, feldspatos, minerales ferromagnesianos y neoformación de arcillas haloisitas, a lo que le sucede posteriormente, la iluviación de los respectivos productos de síntesis.

Por último, se considera los procesos de pérdidas de suelo, mediante procesos erosivos por escurrimiento superficial, erosión eólica, pérdidas de bases y erosión antrópica. Estos limitan la evolución de los suelos, expresando en el perfil la formación de horizontes superficiales delgados, y a la vez propician la exposición de los horizontes subsuperficiales endurecidos.

La evolución de éstos suelos, posee más procesos generales que específicos, ya que, sus características no corresponden a fases maduras de evolución de las cenizas volcánicas. Sin embargo, el desarrollo retardado de estos perfiles, está marcado por un proceso específico, que tiene que ver con los depósitos de nuevas cenizas, en algunos casos de naturaleza diferente, que simplifican los horizontes favoreciendo la haploidización. Es decir, favorecen el rejuvenecimiento y la inestabilidad química del perfil, además retardan el desarrollo por la impedancia pedogénica de los materiales incorporados, ya que en éste caso, poseen mayor contenido de sílice (Johnson y Watson-Stegner, 1987).



Asimismo, en el material endurecido, se expresan algunos procesos de alteración pedogenética, que evidencian procesos específicos de acumulación de agentes cementantes. Referido a los procesos de transformación y transporte de los productos de simplificación de los minerales primarios, para ejercer una acción cementante, y reforzar el carácter endurecido del material original. La figura 25, esquematiza el modelo evolutivo de los perfiles estudiados.

El perfil M4A, refleja procesos de evolución progresiva del perfil, ya que, está relacionado con materiales más antiguos (Plio-Cuaternario), que se han transformado, generando horizontes B₁₁ y B₂, debido, ante todo, a procesos de adición, transformación y traslocación de minerales. Considerando una visión temporal del suelo, éste es el resultado de la transformación gradual de las cenizas volcánicas, en las cuales, la incorporación de materia orgánica ha estado limitada por las condiciones secas de principios del Cuaternario y sus oscilaciones durante éste (Ericson; Tomado de Malagón *et al.*, 1995)

Estas oscilaciones climáticas, variaciones de temperatura y precipitación se ven también reflejadas en los horizontes y capas depositadas en los demás perfiles, ya que, algunos horizontes están muy desbasificados, mientras que en otros, la tendencia general, es que las capas muestreadas, sobre todo de los perfiles M1, M1A y M2, fueron depositadas en ambientes más secos, factor que limitó la formación un horizonte A diferenciado. En contraste, los nuevos depósitos que generan mezcla de cenizas, a pesar de ser de mayor resistencia a la intemperización, han desarrollado, un horizonte A, debido a condiciones más húmedas en las últimas épocas.

En los perfiles estudiados, sólo en el M2 fue identificado un suelo enterrado, que por sus características incipientes de formación, lo asocian a un paleosuelo, desarrollo bajo condiciones más áridas. Esta situación, según la Cepeda y Murcia (*op cit.*) es muy frecuente en el área.

B. Génesis de las capas endurecidas

Como se anotó en la discusión de cada perfil, el horizonte endurecido, localizado la base del horizonte A, corresponde a una toba alterada, con evidencias de cementación por mezclas de

arcilla, compuesto de sílice, y óxidos de hierro y magnesio. Las cuales imprimen marcas pedogenéticas secundarias a las capas e implican transformación y evolución incipientes de la toba hacia un material con característica semejante a un horizonte duripán propiamente dicho.

En la génesis de estas capas, se han implicado procesos geológicos, pedológicos o una combinación de éstos, como ésta citado anteriormente. En muchos casos es muy difícil establecer los límites entre las diagenésis y la pedogénesis en las etapas de alteración del material.

El estudio mineralógico y micromorfológico, particular de estas capas, impone características, heredadas del material inicialmente depositado. La consolidación de la toba se expresa a través de la estructura y microestructura masiva de las muestras. De ahí, que se plantee su origen inicialmente geológico, a partir de depósitos de cenizas volcánicas de edad Plio-Pleistocénica y Holocénica, provenientes de actividad volcánica de diferentes focos del área en cuestión. La consolidación se justifica a partir de los últimos cambios climáticos presentados en el Cuaternario, en los cuales se establecieron condiciones más secas, hipótesis antes planteado para Colombia por Favrie y Gaviria, op cit.

El endurecimiento de estos materiales ha sido en la mayoría de casos, magnificado o conservado mediante procesos pedogenéticos de aportación secundaria. La cementación pedogenética ha estado favorecida por mecanismos de silicificación, eluviación e iluviación de arcillas y óxidos de hierro.

En el caso de la desilicificación, que se prolonga hasta la cementación, la sílice evoluciona y se acumula a partir de la intemperización del vidrio volcánico, pasando por fases intermedias de hidratación, hasta llegar a formas opalinas. Este mecanismo se ve favorecido bajo condiciones bien drenadas y periodos húmedos, con una estación seca marcada. Hipótesis que está apoyada en lo comentado por Thiry; Franzmeier et al.; Soil Survey Staff.; op cit.

Otros rasgos que demuestran estos procesos, son las pedocaracterísticas del material, que están relacionados con procesos secundarios de eluviación-iluviación y lessivaje de arcilla.

FACTORES DE FORMACION

T = 19.4 °C

Evp = 1382 mm/año

Clima de suelo:

- Régimen de humedad ústico
- Régimen de Temp. isomésico
- Zona de vida: bh. M
- Uso del suelo: agricultura de temporal

DIMENSION ESPACIAL

MATERIAL PARENTAL

Cenizas volcánicas tipo andesítico, dacítico y riolítico

TIPO DE RELIEVE

Alliplanicie de topografías irregulares y suaves

PROCESOS DE FORMACION

I. GENERALES

- **ADICIONES**
Depósitos de cenizas
Adición de materia orgánica
- **TRANSLOCACIONES**
M. O., bases, arcillas, óxidos de Fe y Mg
- **TRANSFORMACIÓN**
Neoformación de arcillas, Alteración y síntesis de minerales primarios
- **PERDIDAS**
Erosión eólica y antrópica

T
i
e
m
p
o

CARACTERISTICAS

- **FISICAS:** Textura franca, densidad alta y baja porosidad
- **QUIMICAS:** M.O. baja, pH neutro y ligeramente alcalino, CICT medio y alto, Saturación de bases altos, Ca y Mg alto en el complejo de cambio.
- **MINERALOGICAS:** Arena vitrea, cuarzo, feldespatos sódicos, ferromagnesianos, Arcillas haloisitas.
- **MICROMORFOLOGICAS:**
Distribución referida (cf) porfirico cerrada, matriz fina, revestimientos de arcilla, sílica, cuarzo y óxidos de hierro y magnesio.

II. ESPECIFICOS:

Evidencias - marcas

- Haploidización
Por ganancias de cenizas volcánicas
- Cementación
Por iluvación de arcillas y óxidos de hierro y sílice

Figura 28 Esquema del Modelo evolutivo de los perfiles estudiados

Estos cementan los granos y rellenan poros, en forma de laminas orientadas por los flujos preferenciales, combinadas con laminas de sílice opalina, originada por la alteración y transporte de los minerales primarios. También, se distinguen fisuras a manera de huella, resultado de los mecanismos físicos de alteración del material por efecto de cambios de temperatura, debido a las estaciones de humedad y sequía.

Lo anterior, admite una vez mas, que los horizontes endurecidos, muchas veces se tratan de materiales geológicos consolidados, cuya dureza se ve reforzada por procesos discretos de argilización, silicificación y acumulación de óxidos, como lo proponen Zebrowski; Quiñones; Quantin *et al.* y Flores *et al.*; en el último simposio internacional de suelos volcánicos endurecidos, Quito, 1996.

De otro lado, se identificó otro tipo de material masivo más frágil, que se diferencia por su posición en la geoforma, en este horizonte las concentraciones de SiO_2 son menores, dando características de menor dureza y baja cementación. En este caso, los procesos pedogenéticos que se presentan pueden ser semejantes a los otros perfiles, sin embargo, las características y naturaleza del material parental son muy diferentes, así como también son materiales más antiguos. Estos materiales probablemente no sufrieron consolidación, por lo tanto, ha evolucionado progresivamente, de ahí que la baja acumulación de sílice (determinado por MEB), se deba a la sílice de las estructuras de arcilla, que ejercen la acción cementante en éste caso. La presencia de arcilla, es la que provee características de fragilidad a la capa, denominada densipán.

C. Uso y manejo

La actitud de uso y manejo de estos suelos está relacionada con dos aspectos; el primero tiene que ver con las propiedades físicas del suelo y la capa endurecida. Los suelos ubicados sobre éstos horizontes endurecidos, son muy someros y susceptible a la erosión, ya que poseen baja y débil estructuración.

Por lo tanto su uso y manejo está relacionado con la apropiación de prácticas de manejo y control de la erosión, especialmente cuando se incrementa la pendiente del suelo, evitando la pérdida éste. Además de control de la erosión, es también muy importante, las prácticas en donde se favorezca la formación de agregados estables.

Por otro lado, la capa endurecida significa una limitante en la dinámica de flujos, como infiltración y permeabilidad, también el crecimiento radical e integración de algunos elementos al suelo, de ahí que, la en la planeación está en juego, la selección entre el tipo de producción y la necesidad de incrementar el área de humectación del suelo.

El segundo aspectos, están relacionado con las características químicas de los materiales, estos poseen un potencial para la producción, ya que contienen alta saturación de bases y pH propicio para la producción de diferentes plantas.

Ante el bajo contenido de materia orgánica, su adición produce una respuesta positiva, desde el punto de vista de agregación y mineralización, así como también, las aplicaciones de nitrógeno, representan un elemento importante en la promoción de la actividad vegetal en el medio. Por su origen volcánico, posee limitación con relación al fósforo, debido, a que posee gran capacidad de fijación, pero como se dijo anteriormente, responden muy bien a la adición de materia orgánica, en la cual se puede propiciar la fijación de fósforo.

Las características de las capas endurecidas, están asociadas, principalmente a cementante de arcilla y silice. Su dureza esta relacionada principalmente a procesos de consolidación geológica, de ahí, que el diseño de programas de incorporación de áreas erosionadas a procesos productivos, esta ligada, a programas de reforestación o cultivos perennes. Ya que, una vez se fragmentan estas capas, son muy susceptibles a la erosión, ya que se trata de materiales muy finos.

Bajo cambios de condiciones de humedad, estos materiales posiblemente se alteran mas rápidamente, generando la formación de minerales secundarios silicatados, que favorecen la formación de suelos.

Finalmente se puede decir que la incorporación a la producción agrícola de estos suelos está limitada, pero no hasta los niveles de considerar un suelo completamente infértil. Por experiencias de países como México, Ecuador y Nicaragua se ha demostrado en diferentes capas endurecidas, por sílice y carbonatos, que es posible incorporarlas proceso productivo, principalmente cultivos de ciclo corto, forrajes y árboles frutales.

VIII. CONCLUSIONES

- * Las características morfológicas de los perfiles expresan desarrollo policíclico de los suelos, condicionado por los aportes de nuevas cenizas de focos volcánicos aledaños.
- * El contraste de las propiedades físicas en el perfil sólo se expresan en los primeros 20 cm del perfil, debido a los efectos de la materia orgánica y la acción del clima
- * Las características químicas de los perfiles relacionan en general, a suelos con pH neutro, alta saturación de bases, ricos en calcio y magnesio y capacidad de intercambio catiónico media, asociada a suelos Eutrícos.
- * La mineralogía de los suelos y capas endurecidas, se ubican en una secuencia de alteración intermedia de cenizas de carácter dacítico y andesítico, favorecida, por las condiciones de alteración ústicas e isomésicas, para la formación de arcillas haloisitas, principalmente.
- * El bajo contenido de minerales de poco ordenamiento cristalino, como alofano e imogolita, está relacionado con la naturaleza y propiedades del vidrio volcánico, así como también por las condiciones ambientales internas del suelo.
- * Las evidencias petrográficas y micromorfológicas, expresan la presencia de una toba consolidada, en medio de una matriz fina de impurezas de vidrio volcánico y cenizas finas.
- * Los rasgos pedológicos y los análisis del microscopio de barrido, muestran de manera acertada la acción cementante de los productos de alteración del material parental, entre ellos sílice como cuarzo o sílice opalina, arcillas y óxidos de hierro y magnesio.
- * Las capas endurecidas son materiales con características físicas semejantes a las propiedades de los duripanes, pero ante todo, son materiales geológicos consolidados con aportes secundarios de cementación.
- * Taxonómicamente los perfiles M1, M1A, M3 y M4 se clasifican como un intergrado de los ordenes Entisol - Inceptisol.
- * El perfil M4A, es clasificado en el orden Alfisol, porque corresponde a un suelo de origen más antiguo.

- * Las capas endurecidas son semejantes a los tepetates de México, con características de duripanes, asociadas a tobas alteradas.
- * La evolución de los suelos, se establece bajo un modelo evolutivo de crecimiento retardado, con predominio de los procesos de formación generales, tipificado por dos procesos específicos, haploidización y cementación.
- * Bajo un modelo evolutivo, progresivo, probablemente, estos materiales formarían, en tiempos mayores que los materiales no consolidados, horizontes propiamente dichos, tipo duripán.
- * La génesis de las capas endurecidas, se establece bajo una combinación de factores de formación, primero la consolidación de las cenizas volcánicas, favorecidas por las condiciones más secas de período Holocénico. Segundo, la acción secundaria de agentes cementantes, producto de la alteración pedogenética de las cenizas.

IX. LITERATURA CITADA

- * ARANGO, J. L.; PONCE, A. 1982. Mapa generalizado del Departamento de Nariño, escala 1:400:000. Memoria explicativa, INGEOMINAS. 32p.
- * ARIAS, R. H.; MIRANDA, M. N. 1992. Dinámica de erosión en tepetates roturados. TERRA Vol. 10, No. Especial. México. p. 370 - 377.
- * BESOAIN, M., SADZAWKA, A.; SEPULVEDA, G. 1992. Génesis de los suelos Ñadis, aquands y duranquands de la región centro sur de Chile. TERRA Vol. 10, No. Especial. México. p. 74-88
- * BESOAIN, M. E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. 1285 p.
- * BIRKELAND, P. W., MECHETTE, M. N.; HALLER, K. M. 1990. Soils as a tool for applied quaternary geology. UTAH geological and mineral survey. p. 7-10.
- * BLAKE, G. R. 1965. Bulk density, *in* Methods of Soil analysis. Series Agronomy Part 1. USA. Madison, Wisconsin, p. 374 - 390.
- * BLANK, R. R.; FOSBERG, M. A. 1991. Duripans of Idaho, USA: in situ alteration of eolian dust (loess) to an opal-A/X-ray amorphous phase. Geoderma, 48. p. 131-149.
- * BAVER, L. D., GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. 1973. Física de suelos. UTEHA, México, D.F. 529 p.
- * BRAY, R. H.; KURTZ, L. M. 1945. Determination of total organic and available forms of phosphorous in soil. Soil Sci. 59: 34-45. *in* JACKSON, M.L. 1970. Análisis químico de suelos, Barcelona. Omega. 2a edición. 662 p.
- * BREWER, R. 1964. Fabric and Mineral Analysis of Soils. John Wiley and Sons. New York. 470 p.
- * CAMPOS, A.; DUBROEUCQ, D. 1990. Formación de tepetates en suelos provenientes de la alteración de materiales volcánicos. TERRA Vol. 8 No. 2. p. 137-147.
- * CORTES, L. A., CORTES, B. M.; PALACINO, A. 1982. Los suelos de las cordilleras andinas y su aptitud de uso; Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Colombia. p 3 - 10.

-
- * CORTES, L. A., BERNA, A. B., RODRIGUEZ, C. T., MOTTA, M. B.; ASTIER, L. M. 1986. Estudio general de suelos del Nororiente del Departamento de Nariño, Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. 260 p.
 - * CUATRECASAS, J. 1958. Aspectos de la vegetación natural en Colombia. Rev. Acad. Col. Ciencias Exact. Fis y Nat. Bogotá 10 (40) p. 221 - 264.
 - * CREUTZBERG, J. H., FAUFFMAN, E. M., BRIDGES, G.; DEL POSSO. 1990. Micromorphology of "Canchagua" a cement subsurface horizon in soils from Ecuador p. 367 - 372. in DOUGLAS, L.A. (de) Soil micromorphology: A basic and applied science, Amsterdam.
 - * DUBROEUCQ, D., QUANTIN, P.; ZEBROWSKI, C. 1989. Los tepetates de origen volcánico en México. Esquema preliminar de clasificación. TERRA Vol. 7 No. 1 p. 3-12
 - * DUBROEUCQ, D. 1992. Los tepetates de la región de Xalapa, Veracruz (México); un endurecimiento de origen pedológico. TERRA Vol 10, No. Especial. México. p. 233 - 240.
 - * DAY, P. R. 1965. Particle fractionation and particle-size analysis, in Black, C. A., de. Methods soil analysis; part 1, Physical and mineralogical including statistic of measurement and sampling: Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, p. 545 - 567.
 - * DREE, R. L. WILBING, L. P., SMECK, N. E.; SENKAYI, A. L. 1989. Silica in Soils: Quartz and disordered silica polymorphs: pp. 913 - 974. In DIXON, J.B. y WEED, S.B. SSSA,. Book series 1: Minerals in Soil Enviroments.
 - * ETCHEVERS, B. J., CRUZ, H. L., MARES, A. J.; ZEBROWSKI, C. 1992. Fertilidad de los tepetates I. Fertilidad actual y potencial de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada (México). TERRA Vol. 10. No. Especial. México. p. 379 - 384.
 - * ETCHEVERS, B. J., LOPEZ, R. R., ZEBROWSKI, C.; PEÑA, H.D. 1992. Características químicas de tepetates de referencia de los estados de México y Tlaxcala, Méx. TERRA Vol. 10. No. Especial. México. p. 171-177.
 - * FAIVRE, P.; GAVIRIA, S. 1992. Suelos y formaciones piroclásticas endurecidas en los Andes de Colombia: TERRA Vol. 10. No. Especial. México. p. 89 - 99.
 - * FAO- UNESCO. 1991. Mapa Mundial de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma 142 p.

- * **FAO - UNESCO. 1994.** World Reference base for Soil Resurces International Society of Soil Science, International Soil Reference and information Centro y FAO, Rome. 158p.
- * **FLACH, K. W., NETTLETON, W. D., GILE, L. H.; CADY, J. G. 1969.** Pedocementation: induration by silica, carbonates and sesquioxides in the quaternary. *Soil Science*. 107 (6):442-453.
- * **FLACH, K. W., NETTLETON, W. D.; CHADWICK, O. A. 1992.** The criteria of duripans in the U.S. soil taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize. *TERRA* Vol. 10. No. Especial. México. p. 34 - 45.
- * **FLORES, R. D., GONZÁLEZ, V. A., ALCALA, M. J. R.; GAMA, C. J. 1991.** Los Tepetates. *Revista de Geografía*. 3(4):37-41.
- * **FLORES, R. D., GONZÁLEZ, V. A., ALCALA, M. J. R.; GAMA, C. J. 1992.** Suelos con fragipán de origen volcánico en clima semicálido y subhúmedo. El caso del noreste del Estado de Morelos, México. *UNAM. Revista de Geología*. 10(2): 151 - 163.
- * **FLORES, R. D., GONZÁLEZ, V. A., ALCALA, M. J. R.; GAMA, C. J. 1996.** Duripans in subtropical and temperate subhumid climate of the trans-México volcanic belt. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 13(2): 228-239.
- * **FRANZMEIER, D. P., NORTON, L. D.; STEINHARDT, G. C. 1989.** Fragipan formation in loess of the Midwestern United States. *Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA. Special Publication, No. 24, p. 69 - 97.*
- * **GROSSE, E. 1935.** Acerca de la Geología del sur de Colombia. *CEGOC*. T. III, p. 139 - 231.
- * **GUERRERO, E. G., MOSQUERA, J. L.; OCHOA, E. C. 1992.** Distribución de los tepetates de la República mexicana, escala 1:4.000.000. *TERRA* Vol. 10. No. Especial. p. 131 - 136.
- * **GUTIERREZ, C. M. C. 1988.** Estudio micromorfológico de los cementantes de algunos tepetates del Valle de México y Tlaxcala. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Mex. p. 147.
- * **GUTIERREZ, C. M. C.; ORTIZ, S. C. A. 1992.** Caracterización del tepetate blanco en Texcoco, México. *TERRA* Vol. 10. No. Especial. p. 202 - 209.
- * **HASHIMOTO, I.; JACKSON, M. L. 1960.** Rapid dissolution of allophane and kaolinite-halloysite after dehydration. *Clays and Clay Minerals* 7. p. 102-113.

- * HIDALGO, C. QUANTIN, P.; ZEBROWSKI, C. 1992. La cementación de tepetates; estudio de la silicificación. *TERRA* Vol. 10. No. Especial. México. p 192 - 201.
- * HILLEL, D. 1982. *Introduction to soil physics*. Academic Press, Inc. San Diego 40-52 p
- * HIMAT. 1995. Promedios mensuales de precipitación, temperatura, vientos, brillo solar y determinación de evapotranspiración. Subestación Nariño, Colombia.
- * HOLDRIDGE, L. R. 1987. *Ecología basada en zonas de vida*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José de Costa Rica. p. 13-36.
- * JACKSON, M. L. 1970. *Análisis químico de suelos*, Barcelona. Omega. 2a edición. 662 p.
- * JOHNSON, W. M., McCLELLAN, J. E., McALEB, S. B., ULTRICH, R., HARPER, W. G.; HUTCHINGS, T. B. 1959. Classification and description of soil pores: *Soil Science*, 89(6): 319 - 321.
- * JOHNSON, D. L.; WATSON- STEGNER, D.; JOHNSON, D. N; SCHAETZL, R. J. 1987. Evolution model of pedogenesis. *Soil. Sci.* 143:(5) 349 – 366.
- * ARATHANASIS, A. D. 1989. *Solution chemistry of fragipans; thermodynamic approach to understanding fragipan formation*. University of Kentucky, Lexington, USA. Special Publication, No 24, p.113 - 139.
- * KRAUSKOP, K. B. 1979. *Introduction to geochemistry*: Tokio, McGraw-Hill Kogakusha, 617 p.
- * LINDBO, D. L., RHOTON, J. M., BIGHAM, W. H., HUDNALL, F. S., JONES, N. E., SMECK.; TYLER, D. D. 1995. Toposecuencia de un loess en las riberas bajas del Valle del Misisipi; morfología del fragipán e identificación. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 59: 487 - 500.
- * LUNA, Z. C.; CARLHOUN, G. F. 1973. *Suelos derivados de cenizas volcánicas del Departamento de Nariño*; Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. Vol IX, N. 2. 287p.
- * LUZIO, W.; SAAVEDRA, M. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos de Chile. *TERRA* Vol. 10. No. Especial. México. p. 60 - 67-
- * McCracken, R. J. y WEED, S. B. 1983. Horizontes Pan en suelos del sureste; micromorfología y asociaciones químicas, mineralogía y propiedades físicas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 27: p. 330 - 334.

- * MALAGON, C. D., PULIDO, R. C. y LLINAS, R. R. 1992. Génesis y caracterización de formaciones volcánicas endurecidas en Paleosuelos en la Sabana de Bogotá, Colombia. *TERRA* Vol. 10. No. Especial. México. p. 100-106.
- * MALAGON, C. D., PULIDO, R. C.; LLINAS, R. R. 1991. Génesis y Taxonomía de loa Andisoles Colombianos. *Rev. investigaciones IGAC, Subd. Agrol. Bogotá.* Vol 3, No 1:18p.
- * MALAGON, C. D., PULIDO, R. C., LLINAS, R. R., BELLO, C. CH.; LAMUS, J. F. 1995. Suelos de Colombia; origen, evolución, clasificación, distribución y uso. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. Santa Fé de Bogotá. 632 p.
- * MARIN, C. E., UBEDA, G. E.; VIRAMONTE, O. J. 1971. Contribución al conocimiento de la génesis del talpetate, Catastro e inventario de los Rec. Nat., Managua, D.N. Nicaragua. p. 1-31.
- * MARSAN, F. A.; TORRENT, J. 1989. Fragipan bonding by silica and from oxides in a soil from Northwestern Italy. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 53 (4), p. 1140 - 1145.
- * MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L.. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered by sodium bicarbonate, in *Proceedings. Clays and Clay Minerals* 6. p. 317-327.
- * MUNSELL. 1975. *Soil Color Chart* Munsell Color Company Inc. Maryland, U.S.A.
- * MURCIA, L. A.; CEPEDA, H. V. 1991. Mapa geológico de Colombia, La Unión (Departamento de Nariño), plancha 410. Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química, INGEOMINAS. 22 p.
- * NIMLOS, T. J. 1989. The density and strength of mexican tepetate (duric materials). *Soil Science* Vol. 147. No. 2. p. 23-27.
- * NIMLOS, T. J.; C. ORTIZ-SOLORIO. 1987. Tepetate, The rock mat. *Journal of Soil and Water Conservation.* Vol. 42 No. 2 p. 83-86.
- * OLESCHKO, L. K. 1992. Naturaleza de los patrones morfológicos de los cementantes en algunos tepetates de México. *Memorias del XXV Congreso Nacional de la Ciencias del Suelo.* Acapulco, Gro. Méx. p.2.
- * OROZCO, CH. F., OLESCHKO, P.; ZEBROWSKI, C. 1992. La cementación de tepetates; estudio de la silicificación. *TERRA* Vol. 10. No. Especial. México. p. 192 -201.

- * PARFITT, R. L.; HENMI, T. 1982. Compararision of an oxalate extraction method and infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays, Soil Sci. & Plant Nutr:28: 183 - 190.
- * PARFITT, R. L., SAIGOSA, M.; COWIE, J. D. 1984. Formación de alofano y haloisita en lechos de ceniza volcánica bajo diferentes condiciones de humedad. Soil Science. 139(5):.
- * PEECH, M. 1947. Methods of Soil analysis for soil fertility investigation. U.S. Dep. Agric. Sci. 757p.
- * PEÑA, D.; ZEBROWSKI, C. 1992. Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente Occidental de la Sierra Nevada, TERRA Vol 10, No. Especial. México p. 156 - 164.
- * POETSCH, T.; ARIKAS, K. 1996. Caracterización, génesis y cartografía de los suelos volcánicos endurecidos, Introducción. Memorias del III Simposio Internacional de Suelos Endurecidos. Quito. p. 56-65.
- * PORTA, J.; LOPEZ ACEVEDO, M.; ROQUERO, C. 1994. Edafología y medio ambiente. Munda Prensa, España. 789 p
- * POWERS, M. C. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles: Journal of Sedimentary Petrology. Vol 23, p. 117 - 119.
- * PRAT, C. y QUANTIN, P. 1992. Origen y génesis del "talpetate" horizonte endurecido de los suelos volcánicos de la región Centro Pacífico de Nicaragua. TERRA Vol. 10. No. Especial. México. p.267 - 282.
- * PRIMAVESI, A. 1980. Manejo ecológico del suelo. La agricultura en regiones tropicales. Librería El Ateneo Buenos Aires p. 183-227.
- * QUANTIN, P., ARIAS, A., ETCHEVERS, J., FERRERA, R., OLESCHKO, K., NAVARRO., WERNER, G.; ZEBROWSKI, C. 1993. Tepetates de México: caracterización y habilitación para la agricultura. TERRA Vol. 11. No. Especial. p.3-69
- * QUANTIN, P., ZEBROWSKI, C., DELOUNE, M.; HIDALGO, C. 1992. El material original de los tepetates T2 y T3 de la región de Texcoco (México), ¿Loess o cineritas?. . TERRA Vol. 10. No. Especial, México. p. 178-182.
- * QUANTIN, P. 1996. Apuntes del Tercer Simposio de suelos volcánicos endurecidos. Ecuador.

-
- * QUIÑONES, G. H. 1987. La química del silicio; Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH. Chapingo, México. p. 19-28.
 - * RUIZ, F. J. F. 1987. Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH, México. p. 58-68.
 - * SANCHEZ, J. M., RUIZ, F. J. F.; CAUTLE, F. E. 1987. Comportamiento de dos tipos de tepetate bajo la adición de abonos orgánicos y abonos verdes en condiciones de invernadero. En: RUIZ, F.J.F. Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACH, México. p 58 - 68.
 - * SHOJI, S., NANZYO, M.; DAHLGREN, R. 1993. Volcanic ash soils; Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21. Elsevier, Tokyo. p 101-143.
 - * SOIL SURVEY STAFF. 1975. Soil taxonomy. Agric. Handbook 436. SCS- USDA. 744 p.
 - * SOIL SURVEY STAFF. 1984. Procedures for collecting soil samples and methods of analysis for soil survey. Washington, D.C. Soil Survey Investigations Report No. 1.
 - * SOIL SURVEY STAFF. 1994. Keys to Soil Taxonomy, Soil Conservation Service. Claves para la Taxonomía de Suelos. Traducción de ORTIZ, S. C. USDA. 576p.
 - * THIRY, M. 1992. Pedogenic silicifications; structures, micromorphology, mineralogy and their interpretation. TERRA Vol. 10. No. Especial. p. 46 - 59.
 - * THORNTWHAITE, C. W. 1994. Manual. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, SARH, México.
 - * VALDEZ, M. L. A. 1970. Caracterización morfológica y mineralógica de los suelos de tepetates de la Cuenca de México. Tesis de Maestría en Ciencias. ENA. Chapingo, México.
 - * VAN DER HAMMEN, T. 1973. El Cuaternario en Colombia. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology, 14: 1- 92.
 - * VAZQUEZ, A. A.; BAUTISTA, A. N. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. UACH. México. 26p.
 - * VERA, R.; LOPEZ, R.. 1992. Tipología de la Cangahua. TERRA Vol 10 No. Especial. Méx. p. 113-119

- * VERBEEK, A. A., MITCHELL, M. C.; URE, A. M. 1982. The analysis of small samples of rock and soil by atomic absorption and emission spectrometry after a lithium metaborate fusion/nitric acid dissolution procedure. *Analytica chimica acta* 135: 215 - 228.
- * WALKEY, A. 1947. Critical examination for determining organic carbon in soils. *Soil. Sci.*, 63:251 - 264.
- * WINCKELL, A.; ZEBROWSKI, C. 1992. La Cancahua en Equateur: le contexte paléogéographique de sa formation. *TERRA* Vol. 10. No. esp. México. p. 107 - 112.
- * WILSON, M. J. 1994. *Clay Mineralogy: spectroscopic and chemical determination methods.* Chapman & Hall London. p. 334 - 357.
- * ZEBROWSKY, C. 1992. Los suelos volcánicos endurecidos en América Latina En: Primer Simposio Internacional de Suelos Volcánicos Endurecidos. *TERRA* Vol 10. No. Especial. México. p. 1-4.
- * ZEBROWSKY, C., QUANTIN, P.; TRUJILLO, G. 1996. Caracterización, génesis y cartografía de los suelos volcánicos endurecidos, Introducción. *Memorias del III Simposio Internacional de Suelos Endurecidos.* Quito. p. 1-10.

Anexo 1.

Pasos metodológicos para calcular el Índice de Desarrollo de Perfiles (IDP) e Índice de Desarrollo del Horizonte (IDH)

1. Descripción morfológica del perfil: espesor, color, textura, películas de arcilla, estructura, carbonatos, etc.
2. Identificación del material parental u horizonte C.
3. Asignación de un valor o puntaje a cada propiedad por cada horizonte; ejemplo Textura: arcilla >> arena; Color: pardo >> amarillo
4. Normalización cuantitativa de las propiedades: se divide el valor por el valor máximo que cada propiedad pueda tomar.
5. Suma de los valores normalizados de las propiedades por cada horizonte.
6. Se divide por el número o cantidad de propiedades = IDH
7. Se multiplica por el espesor del horizonte
8. Se suman los productos a través de cada perfil = IDP

Fuente: Harden y Taylor; citado por Birkeland, *et al.*, 1990