



# **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA  
Ciencias Ambientales

“CRONOSECUENCIA DE SUELOS EN LOS CORDONES  
LITORALES HOLOCÉNICOS DEL BAJO GRIJALVA, MÉXICO”

## **TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

**FELIX JUAN CARLOS HINOJOSA ESPINOZA**

JURADO EXAMINADOR

Dr. Sergey Sedov, Instituto de Geología  
Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Instituto de Geología  
Dra. Christina Désireé Siebe Grabach, Instituto de Geología  
Dra. Teresa Pi Puig, Instituto de Geología  
Dr. Héctor Víctor Cabadas Báez, Facultad de Geografía UAEM

**MÉXICO, D.F. ABRIL, 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

*DEDICATORIA*

*En memoria del Dr. Mario Arturo Ortíz Pérez*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la U.N.A.M. por darme la gran oportunidad de ser parte de la experiencia que es estar en la Máxima Casa de Estudios de México.

A CONACYT por el apoyo tan necesario como lo es una beca.

Al Instituto de Geología, por brindarme las herramientas necesarias para explorar mi pasión intelectual: la Geología y en especial los suelos.

A los proyectos PAPIIT-IN108914 “Paleosuelos asociados a registros paleontológicos y arqueológicos: desarrollo de proxies paleoambientales integrales” (S. Sedov) y PAPIIT-IN105215 “Reconstrucción ambiental de los geosistemas costeros de México durante el Cuaternario basado en evidencias paleopedológicas” (E. Solleiro), por el apoyo económico en la realización de la tesis.

A mis asesores el Dr. Sergey Sedov y la Dra. Elizabeth Solleiro, por creer en mí, apoyarme y acogerme en el grupo de paleosuelos. Al grupo de compañeros de la Universidad de Utrecht, Holanda, por mostrarme los sitios que se integran en este trabajo, así como por compartir sus dataciones que hicieron posible la construcción de la cronosecuencia.

Al jurado, conformado por la Dra. Christina Siebe, Dra. Teresa Pi y Dr. Héctor Cabadas, por sus consejos y dirección en la realización de la tesis.

Al Dr. Mario Arturo Ortiz-Pérez †, por ser ejemplo de fortaleza y compromiso.

Al M.C. Jaime Díaz, Dr. René Alcalá y la M.C. Kumiko Shimada por el apoyo en los análisis de laboratorio. Al M. en C. Hermenegildo Barceinas por su colaboración en los estudios de propiedades magnéticas.

A todos lo que con sus consejos, dirección y amistad me ayudaron a la realización de este trabajo: Giny, Oney, Yaz, Bere, Gabo, Davis.

A mi Anny por todo el amor, apoyo y comprensión durante este tiempo.

A mi Familia por comenzar y terminar esta parte de mi vida juntos, con apoyo y amor incondicional.

# Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>3</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>3</b>
<b>I.1 Justificación</b> .....	<b>5</b>
<b>I.2 Hipótesis</b> .....	<b>6</b>
<b>I.3 Objetivos</b> .....	<b>7</b>
I.3.1 Objetivo general.....	7
I.3.2 Específicos.....	7
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>8</b>
<b>Antecedentes</b> .....	<b>8</b>
<b>II.1 Suelo: definición y factores formadores</b> .....	<b>8</b>
<b>II.2 Teorías de la evolución de suelo</b> .....	<b>9</b>
<b>II.3 Nuevo modelo de pedogénesis</b> .....	<b>10</b>
<b>II.4 Procesos pedogenéticos específicos</b> .....	<b>11</b>
<b>II.5 Tiempos característicos</b> .....	<b>12</b>
<b>II.6 Cronosecuencias: concepto y clasificación</b> .....	<b>17</b>
<b>II.7 Indicadores de pedogénesis en cronosecuencias</b> .....	<b>24</b>
<b>II.8 Pedogénesis en ambientes tropicales</b> .....	<b>26</b>
II.8.1 Clima mediterráneo cálido - Fersialitización.....	27
II.8.2 Clima subtropical - Brunificación .....	27
II.8.3 Clima tropical húmedo – Ferralitización .....	28
<b>II.9 Estudios de caso: cronosecuencias de suelos en clima tropical</b> .....	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>32</b>
<b>Materiales y Métodos</b> .....	<b>32</b>
<b>III.1 Muestreo y análisis en campo</b> .....	<b>32</b>
<b>III.2 Análisis de laboratorio</b> .....	<b>32</b>
III.2.1 Textura.....	32
III.2.2 pH y conductividad eléctrica.....	32
III.2.3 Materia orgánica.....	33
III.2.4 Densidad aparente.....	33
III.2.5 Susceptibilidad magnética .....	33
III.2.6 Óxidos de Fe pedogénicos .....	34
III.2.7 Fluorescencia de Rayos X: Fe, K, Ti y Zr totales .....	34
III.2.8 Difracción de Rayos X: filosilicatos pedogénicos.....	34
III.2.9 Análisis micromorfológico .....	35
III.2.10 Dataciones .....	35
III.2.11 Procedimientos matemáticos y estadísticos.....	35
<b>III.3 Área de estudio</b> .....	<b>35</b>
III.3.1 Delimitación del área de estudio .....	35
III.3.2 Microrelieve: sistema de cordones.....	36
III.3.3 Dinámica de formación de cordones .....	37
III.3.4 Edafología en el área de cordones y planicie costera .....	38
Figura 12. Modelo de toposecuencia de la planicie costera de Tabasco, por Ortíz-Pérez, <i>et al</i> , 2005 .....	39

III.3.5 Clima del área de cordones .....	39
III.3.6 Vegetación de área de cordones .....	40
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>41</b>
<b>Resultados.....</b>	<b>41</b>
<b>IV.1 Descripción de perfiles en campo .....</b>	<b>41</b>
IV.1.1 Generalidades básicas y descripción morfológica de los perfiles de la cronosecuencia.....	41
IV.2.1 Playa Cocoterros.....	49
IV.2.2 Cocoterros .....	50
IV.2.3 Rancho Magdalena 2 .....	52
IV.2.4 Simón Sarlat.....	53
<b>IV.3 Análisis de laboratorio.....</b>	<b>54</b>
IV.3.1 Densidad aparente .....	54
IV.3.2 Textura en % .....	55
IV.3.3 Arcilla en kg m <sup>-2</sup> .....	55
IV.3.4 Difracción de rayos X: tipo de arcilla y minerales .....	58
IV.3.5 pH y conductividad eléctrica .....	62
IV.3.6 Materia orgánica: en % .....	64
IV.3.7 Materia orgánica: en Kg m <sup>-2</sup> .....	64
IV.3.8 Gráficas Resumen .....	66
IV.3.9 Fluorescencia de rayos X: K, Fe, Ti y Zr totales.....	70
IV.3.10 Fe pedogénico: extracciones selectivas de Fe con citrato- bicarbonato-ditionito y oxalato de amonio.....	72
IV.3.11 Susceptibilidad Magnética .....	83
IV.3.12 Gráficas Resumen .....	85
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>89</b>
<b>Discusión .....</b>	<b>89</b>
<b>V.1 Homogeneidad del material parental y su estimado en volumen inicial.....</b>	<b>90</b>
<b>V.2 Tendencia de la pedogénesis en la cronosecuencia. ....</b>	<b>92</b>
V.2.1 Materia orgánica.....	92
V.2.2 Óxidos de Fe .....	98
V.2.3 Arcillas: tendencias y tipos en la cronosecuencia.....	104
V.2.4 Modelo propuesto de suelos en cordones litorales de Tabasco. ....	108
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>110</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>110</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>112</b>
<b>Anexo .....</b>	<b>118</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1. Procesos pedogenéticos específicos.....	12
Tabla 2. Perfiles muestreados para la cronosecuencia,.....	41
Tabla 3. Perfil Playa Cocoterros.....	42
Tabla 4. Perfil Cocoterros.....	43
Tabla 5. Perfil Rancho Magdalena 2.....	45
Tabla 6. Perfil Simón Sarlat.....	47
Tabla 7. Valores de densidad aparente.....	54
Tabla 8. Concentración relativa y arcillas minerales identificadas en los perfiles de la cronosecuencia.....	61
Tabla 9. Concentraciones totales de Kg/horizonte de K, Fe, Ti y Zr.....	70
Tabla 10. Valores de las relaciones Fed/Fet y Feo/ Fed.....	81
Tabla 11. Valores de Xlf y Xfd.....	118
Tabla 12. Valores de densidad aparente, límite inferior y espesor de horizonte, para determinar Fed-Feo-Fet-arcilla y materia orgánica de mg/g a Kg m <sup>-2</sup> .....	122

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama esquemático de variaciones en el tiempo para alcanzar el estado estable.....	13
Figura 2. Tiempos característicos de los procesos pedogenéticos, en el auto-desarrollo del suelo.....	14
Figura 3. Tiempos característicos (TC) de los principales horizontes diagnóstico y propiedades usados en la WRB. ....	15
Figura 4. Ilustración esquemática de la variación de una propiedad del suelo con el tiempo.....	16
Figura 5. Interrelación entre litomemoria y pedomemoria.....	16
Figura 6. Esquema de cronosecuencias post-incisivas.....	21
Figura 7. Esquema de cronosecuencias pre-incisivas. ....	22
Figura 8. Esquema de cronosecuencias Tiempo-transgresivas sin superposición histórica. ....	22
Figura 9. Esquema de cronosecuencias Tiempo-transgresivas con superposición histórica. ....	23
Figura 10. Diagrama conceptualizado de Duchaufour's (1982).....	28
Figura 11. Se delimita el área de los sistemas de cordones A, B y C.....	36
Figura 12. Modelo de toposecuencia de la planicie costera de Tabasco (Ortíz-Pérez, et al, 2005).....	39
Figura 13. Micromorfología: horizonte A de Playa cocoterros.....	50
Figura 14. Micromorfología: horizonte A2 de Cocoterros.....	51
Figura 15. Micromorfología: horizonte Cg1 de playa cocoterros, minerales primarios.....	52
Figura 16. Micromorfología: horizonte Cg1 de playa cocoterros, óxidos de Fe.....	52

Figura 17. Micromorfología: horizonte A1 de Simón Sarlat.....	53
Figura 18. Porcentaje y concentración en Kg, de arcilla en los perfiles de la cronosecuencia.....	57
Figura 19. Difractogramas de las muestras totales superpuestos, mostrando principales minerales y débil fracción arcilla.....	58
Figura 20. Resultados de la fase arcilla en el horizonte A2 del perfil Cocoterros. En donde se muestra el difractograma con sus tres mediciones: or, GL y T dando como resultado picos para vermiculitas, illitas y material caolinítico.....	60
Figura 21. Valores de pH y Conductividad Eléctrica en la cronosecuencia.....	63
Figura 22. Valores de porcentaje de materia orgánica en los horizontes.....	64
Figura 23. Valores en Kg/horizonte de materia orgánica.....	65
Figura 24. Gráfica resumen de Playa Cocoterros, con: profundidad, horizonte, color, textura, conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.....	66
Figura 25. Gráfica resumen de Cocoterros, con: profundidad, horizonte, color, textura, conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.....	67
Figura 26. Gráfica resumen de Rancho Magdalena 2, con: profundidad, horizonte, color, textura, conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.....	68
Figura 27. Gráfica resumen de Simón Sarlat, con: profundidad, horizonte, color, textura, conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.....	69
Figura 28. Valores de la relación Ti/Zr en horizontes de la cronosecuencia.....	72
Figura 29. Playa Cocoterros: comparación de los valores de Feo con el Fed y Fed con el Fet.....	73
Figura 30. Playa Cocoterros: comparación, en perfil, de valores de Fet%, Fed%, Feo%, Fed/Fet y Feo/Fed.....	74
Figura 31. Playa Cocoterros: comparación de los valores kilogramo de Fed y Feo.....	74
Figura 32. Cocoterros: comparación de los valores de Feo con el Fed y Fed con el Fet.....	75
Figura 33. Cocoterros: comparación, en perfil, de valores de Fet%, Fed%, Feo%, Fed/Fet y Feo/Fed.....	76
Figura 34. Cocoterros: comparación de los valores kilogramo de Fed y Feo.....	76
Figura 35. R. Magdalena 2: comparación de los valores de Feo con el Fed y Fed con el Fet.....	77
Figura 36. R. Magdalena 2: comparación, en perfil, de valores de Fet%, Fed%, Feo%, Fed/Fet y Feo/Fed.....	78
Figura 37. R. Magdalena 2: comparación de los valores kilogramo de Fed y Feo.....	79
Figura 38. Simón Sarlat: comparación de los valores de Feo con el Fed y Fed con el Fet.....	79
Figura 39. Simón Sarlat: comparación, en perfil, de valores de Fet%, Fed%, Feo%, Fed/Fet y Feo/Fed.....	80
Figura 40. Simón Sarlat: comparación de los valores kilogramo de Fed y Feo.....	81
Figura 41. Gráficas de susceptibilidad magnética (Xlf) y dependencia de frecuencia ... (Xfd), para los perfiles de la cronosecuencia.....	84
Figura 42. Gráfica resumen de Playa Cocoterros, con: profundidad, horizonte, color, susceptibilidad magnética (Xlf), dependencia de frecuencia (Xfd), % de Fet, % de Fed, % de Feo, Relaciones Fed/Fet- Feo/Fed y Relación Ti/Zr.....	85



Figura 43. Gráfica resumen de Cocoterros, con: profundidad, horizonte, color, susceptibilidad magnética (Xlf), dependencia de frecuencia (Xfd), % de Fet, % de Fed, % de Feo, Relaciones Fed/Fet- Feo/Fed y Relación Ti/Zr.....	86
Figura 44. Gráfica resumen de Rancho Magdalena 2, con: profundidad, horizonte, color, susceptibilidad magnética (Xlf), dependencia de frecuencia (Xfd), % de Fet, % de Fed, % de Feo, Relaciones Fed/Fet- Feo/Fed y Relación Ti/Zr.....	87
Figura 45. Gráfica resumen de Simón Sarlat, con: profundidad, horizonte, color, susceptibilidad magnética (Xlf), dependencia de frecuencia (Xfd), % de Fet, % de Fed, % de Feo, Relaciones Fed/Fet- Feo/Fed y Relación Ti/Zr.....	88
Figura 46. Cronofunción Ti/Zr, donde se aprecia la discontinuidad entre PC y SS, ....apoyado en el error de correlación.....	91
Figura 47. Relación entre, cronofunción de Kg de Ti a 185cm, como indicador de volumen original del material parental y Fet.....	92
Figura 48. Línea de tendencia lineal positiva del modelo de regresión lineal. Cronofunción del porcentaje de Materia Orgánica.....	93
Figura 49. Línea de tendencia lineal positiva del modelo de regresión lineal. Cronofunción de Kg por perfil de Materia Orgánica.....	94
Figura 50. Micromorfología: comparación de Materia orgánica en PC y SS.....	95
Figura 51. Línea de tendencia potencial negativa del modelo de regresión lineal. Cronofunción de la tasa de acumulación en materia orgánica por año.....	96
Figura 52. Líneas de tendencia potencial del modelo de regresión lineal. Relación entre espesor del los horizontes A en el tiempo, y la tasa de acumulación en gramos de MO por año.....	97
Figura 53. Nuevo modelo de estudio de cronosecuencia: Sub-perfiles, oxidado y Redox.....	99
Figura 54. Comparación de las cronofunción. Los incisos a) Fed/Fet y b) Feo/Fed, muestran las tendencias de la parte del solum. c) Fed/Fet y d) Feo/Fed de la parte oxido-reducida.....	100
Figura 55. Líneas de tendencia exponenciales del modelo de regresión lineal. Cronofunciones de Fed y Feo en Kg.....	101
Figura 56. Línea de tendencia potencial negativa del modelo de regresión lineal. Cronofunciones de las tasas de acumulación de Fed y Feo en gr por año.....	101
Figura 57. Micromorfología: comparación entre PC y SS, en relación a presencia de recubrimientos de óxidos de Fe.....	102
Figura 58. Línea de tendencia potencial negativa del modelo de regresión lineal. Cronofunciones de las tasas de acumulación de solum y propiedades gléyicas en mm por año.....	103
Figura 59. Líneas de tendencia positiva del modelo de regresión lineal. Cronofunciones de la arcilla (% y Kg) en la cronosecuencia.....	105
Figura 60. Micromorfología: comparación entre Pc y SS, para arcillas.....	105
Figura 61. Relación entre, cronofunción de Kg de Ti a 185cm, como indicador de volumen original del material parental y la línea de tendencia de la arcilla. Como herramienta para intuir la formación de arcilla pedogenética de la arcilla inicial propia de los procesos sedimentarios.....	106
Figura 62. Líneas de tendencia polinómica del modelo de regresión lineal. Relación entre arcillas del solum de cada perfil y la tendencia del K.....	107

Figura 63. Línea de tendencia potencial negativa del modelo de regresión lineal.  
Cronofunción de la tasa de acumulación de arcilla por año.....108

Figura 64. Modelo propuesto de suelos en los cordones litorales de Tabasco. En donde se dibuja el avance de la pedogénesis tanto en la cronosecuencia como en cada perfil, siendo esto último indicado por las flechas rojas (pedogénesis en el solum) y flechas azules (pedogénesis en la parte redox).....109

## Resumen

Los estudios de cronosecuencias de suelos en diferentes geosistemas alrededor del mundo han proporcionado información importante sobre el desarrollo de suelos. No obstante, existen pocos trabajos que toman temporalidades cortas, como el Holoceno. Los suelos desarrollados en los cordones de arena de la planicie costera de Tabasco, ofrecen la oportunidad de estudiar una cronosecuencia de suelos tropicales jóvenes, cuya edad no sobrepasa el Holoceno medio. De esta manera, este trabajo tiene como objetivo determinar la velocidad y dirección del desarrollo y evolución de los procesos pedogenéticos en los suelos de estos cordones. Los cordones litorales tabasqueños han sido formados por la compleja dinámica fluvial y oleaje marino, y representan antiguas líneas de costa. Cada cordón tiene diferente temporalidad, así como los suelos desarrollados sobre ellos tienen escalas cronológicas diferentes. Esto nos permite establecer una cronosecuencia de suelo. Los suelos estudiados son: el perfil Playa Cocoteros (Arenosol) con sólo 35 años de desarrollo, Cocoteros (Arenosol) con 1307 años antes del presente (AP), Rancho Magdalena 2 (Arenosol) con 4397 AP y Simón Sarlat (Cambisol) con una edad de 5100 AP. Los análisis morfológicos requeridos para el desarrollo de la investigación son: textura, color, estructura; pH; conductividad eléctrica (CE); materia orgánica (MO); susceptibilidad magnética (Xlf) y susceptibilidad magnética dependiente de la frecuencia (Xfd); difracción de rayos X en la muestra total y en la fracción arcilla; fluorescencia de rayos X para determinar hierro ( $Fe_t$ ), K, Ti y Zr totales; extracción de hierro pedogenético ( $Fe_d$ ) con ditionito-citrato-bicarbonato; extracción de hierro amorfo ( $Fe_o$ ) con solución de oxalato; rasgos micromorfológicos en láminas delgadas; y densidad aparente.

En general, los perfiles de la cronosecuencia son de textura arenosa y muestran un desarrollo débil de estructura, con pH neutro y conductividad eléctrica baja. El contenido de materia orgánica en los horizontes A aumenta de 0.81 a 4.47 % ( de 0.67 kg/m<sup>2</sup> a 18.1 kg/m<sup>2</sup>) con el tiempo en la cronosecuencia, como también su grado de humificación, como lo muestra el análisis micromorfológico. En relación a la dinámica

de neoformación de óxidos de Fe se observa, con base en las relaciones  $Fe_d/Fe_t$ ,  $Fe_o/Fe_d$ ,  $X_{lf}$  y  $X_{fd}$ , que existe una acumulación de óxidos de hierro pedogenéticos en el solum por acción de la pedogénesis normal propia del lugar; también se observa otro patrón pedogenético en la parte baja del perfil dado por cambios en las condiciones de óxido/reducción en el contacto con el manto freático. Además, en la cronosecuencia, se documenta un aumento con la edad de los suelos de la producción y acumulación de óxidos de Fe cristalinos. También la cantidad de arcilla aumenta de 1 a 11.2 % (y de 0.79 kg/m<sup>2</sup> a 44.12 kg/m<sup>2</sup>) a través de la cronosecuencia, de los perfiles jóvenes a los antiguos.

Con los datos fue posible establecer cronofunciones de los diferentes procesos pedogenéticos. Todas ellas muestran un comportamiento lineal, es decir ninguno de los procesos estudiados alcanza aún algún punto de equilibrio dinámico lo que demuestra que son procesos relativamente jóvenes, con un desarrollo incipiente.

*Palabras clave:* cronosecuencia de suelos, cordones costeros, cronofunciones, pedogénesis, equilibrio dinámico.

# CAPÍTULO I

## Introducción

Como veremos a lo largo de este trabajo, una cronosecuencia de suelo representa la oportunidad especial para entender la dinámica de desarrollo y evolución de los suelos.

Haciendo una revisión de estudios previos, encontramos cronosecuencias de suelos como los de Sauer *et al* en Noruega (2008) e Italia (2012) o las de Pfeiffer, *et al* (2012) en Chile, ambos en sedimentos y terrazas marinas; no obstante, el clima bajo el que se desarrollan es muy distinto al del presente trabajo (tesis). De este modo para encontrar una coincidencia de clima y geosistema, se revisaron trabajos en China, Barbados y Costa Rica (que se verán a detalle en un apartado) que presentan cronosecuencias de suelos en climas muy similares, y una de ellas es desarrollada en un material parental similar al de esta tesis aunque no el mismo geosistema (Costa Rica).

Entonces, bajo la dirección, ideas y modelos de estos trabajos anteriores, los apartados que conforman esta tesis se han planeado con una estructura tal, que lleva a un juego entre la deducción y la inducción, trabajando de lo general a lo específico para puntualizar y de lo específico a lo general para generar ideas e hipótesis.

En la introducción se establece el rumbo de la investigación, oportunidades que presenta la misma, y las posibles respuestas al problema planteado, el cual consiste en establecer la cronosecuencia de suelos, identificar los procesos pedogenéticos específicos y determinar sus tiempos característicos, para conocer la dirección y grado del desarrollo de la pedogénesis.

En materiales y métodos, ubico y delimito el área de estudio. También describo los métodos y técnicas utilizados para comprobar las hipótesis derivadas de los objetivos.

En los resultados describo la información que obtuve después de aplicar los métodos y técnicas, la cual se interpretó en la discusión. De esta manera, procuro responder los problemas concretos planteados en la tesis.

## **I.1 Justificación**

El uso de los suelos para el estudio de la evolución de diferentes geformas derivó del hecho de que los suelos forman una parte esencial de todas las superficies geomorfológicas; es por esto que la historia de la evolución del paisaje está íntimamente vinculada con la historia del desarrollo del suelo (McFadden y Knuepfer, 1990). Así, los cordones litorales de Tabasco, nos ofrecen las siguientes oportunidades y ventajas que hemos querido aprovechar:

- El estudio de la dinámica de formación de suelos en cronosecuencias tropicales es muy limitado, y tratan secuencias temporales muy largas (Cuaternario y Terciario). En cambio, esta cronosecuencia es muy reciente, abarca del Holoceno medio al presente, y se encuentra en un ambiente tropical en México.
- En México no existe un estudio formal de cronosecuencias de suelos sobre cordones litorales en Trópico, siendo este trabajo el primero.
- Ya que una vida humana o varias, no son suficientes para ver la mayoría de los procesos formadores de suelo, los cordones litorales de la planicie costera de Tabasco, presentan la oportunidad ideal para el estudio de suelos tropicales enmarcados en una cronosecuencia de varios milenios.

## **I.2 Hipótesis**

De acuerdo a la estructura geomorfológica del cordón litoral, se espera que la pedogénesis aumente conforme la distancia al mar se hace mayor. La exposición del material parental similar a condiciones bioclimáticas semi-uniformes, permite que el desarrollo de suelos responda a la edad de la superficie. En el intervalo de tiempo considerado en este trabajo (miles de años) se desarrollan principalmente los procesos de tiempos característicos cortos (como acumulación y humificación de materia orgánica, estructuración, gleyización, entre otros), mientras que para que ocurran los procesos pedogenéticos lentos (como la ferralitización, iluviación de arcillas, etc.), el tiempo aun no es suficiente.



## **I.3 Objetivos**

### **I.3.1 Objetivo general**

Estudiar una cronosecuencia holocénica de suelos con el fin de determinar el grado y velocidad de desarrollo de los suelos en etapas tempranas de la pedogénesis, y así conocer la dinámica de formación de suelos en el ambiente tropical de cordones litorales de la planicie costera del bajo Grijalva, Tabasco, México.

### **I.3.2 Objetivos específicos**

- Determinar si la fuente de procedencia del material parental, que sustenta el desarrollo de los suelos de la cronosecuencia, es homogénea a través de la misma.
- Establecer la tipología y grado de desarrollo de los procesos pedogenéticos, en los suelos de la cronosecuencia.
- Determinar los tiempos característicos de los procesos pedogenéticos identificados en la cronosecuencia.

## CAPÍTULO II

### Antecedentes

#### II.1 Suelo: definición y factores formadores

La definición de suelo depende del enfoque con el cual se quiere estudiar el suelo. Y que puede ser desde la perspectiva edafológica (que enfatiza la fertilidad del suelo) o de la pedológica (Bockheim et al, 2004).

En este trabajo se estudia al suelo desde la perspectiva pedológica. Un concepto de suelo útil para efecto de este estudio, se logra integrar gracias a las siguientes definiciones, que juntas ofrecen un panorama preciso de la dirección en la que se pretende su estudio.

De acuerdo con Joffe (1949), citado por Birkeland (1984), un suelo se describe como un cuerpo natural (anisotrópico) que consiste de capas u horizontes de componentes minerales y / o orgánicos de espesores variables, que difieren del material parental en sus características morfológicas, físicas, químicas, biológicas y mineralógicas.

Si encapsulamos gráficamente la definición, poniéndole entradas y salidas de materia y energía (Targulian y Sokolova ,1996, citado por Targulian y Krasilnikov, 2007), veremos al suelo como un reactor en donde, por producto de la pedogénesis, se forma una memoria de registro de procesos pedogenéticos específicos. Reconocemos al suelo entonces como un sistema complejo que cambia en entropía y es controlado por vías de desarrollo convergente y divergente (Phillips, 2000).

Estas vías de desarrollo están determinadas por la influencias de los factores formadores de suelo que reconoció Dokuchaev y posteriormente completó Jenny (1941). Éstos son el clima, la actividad de los organismos, el material parental, el relieve y el tiempo. Jenny (1941) consideró la posibilidad de algunos otros factores

formadores, aun no descubiertos. Este autor relacionó estos factores en la siguiente ecuación:

$$S = f(\text{cl, o, r, p, t, ...})$$

donde cl= clima, o= organismos, r= relieve, p= material parental (...)= otros factores, y t= tiempo.

La ecuación tiene la finalidad de expresar la compleja relación entre los factores formadores de suelo en términos matemáticos, y dar una base para la interpretación de atributos del suelo en términos de la historia pedogenética (Bockheim et al, 2004).

Posteriormente, Bidwell y Hole (1965) reconocieron al hombre como un factor en la formación de suelo, que Yaalon y Yaron (1966) llaman “metapedogénesis” pues describe procesos y cambios inducidos por el hombre en el perfil del suelo, que sin duda aumentará en importancia (Stevens y Walker, 1970). De esta manera, se contribuye a desentrañar el campo de los factores formadores aún no conocidos.

## **II.2 Teorías de la evolución de suelo**

Entender la dinámica interior y exterior del suelo ha requerido de mucho tiempo de observación, estudio y experimentación dentro de la comunidad científica. Así han nacido a lo largo de la historia, algunas teorías (modelos) sobre la pedogénesis (su desarrollo y evolución) y su relación con los factores formadores, en especial el tiempo.

El modelo *climácico o de estado estable* es uno de los más aceptados. Este modelo supone que los distintos componentes del suelo alcanzan su estado estable, y permanecen sin variar sus características en el tiempo. Otros modelos, denominados *evolucionistas*, suponen que el suelo atraviesa por diferentes etapas de evolución o estados relativos de desarrollo, en donde los suelos, al acercarse a la madurez o

senilidad, paralizan o minimizan los procesos, por lo que el concepto de estado estable resultaría implícito en esta concepción. Por último, los modelos *continuistas* niegan el estado estable, y consideran que a grandes escalas (más allá de sistemas termodinámicos sencillos) no puede establecerse un equilibrio, pues siempre habrá alguna propiedad (como la acumulación de sesquióxidos de hierro y aluminio) que continúe incrementándose con el tiempo (Calero, 2005).

### **II.3 Nuevo modelo de pedogénesis**

Una nueva forma de interpretar los modelos clásicos de evolución de suelo ha cobrado auge a la luz de la teoría de sistemas dinámicos no lineales, que Huggett (1998) llama ***nuevo modelo evolucionista de la pedogénesis***. Este modelo retoma principalmente el modelo climácico.

De acuerdo con Huggett (1998), este nuevo modelo propone dos premisas que desafían los modelos clásicos (llamados desarrollistas). La primera, con respecto a un trabajo empírico sobre cambios ambientales, muestra que la norma es la inconstancia de las condiciones ambientales (Huggett, 1997; citado por Huggett, 1998). Considerando este factor, es improbable que una secuencia de desarrollo del suelo siga siempre su curso completo bajo un ambiente constante. La segunda afirma que se ha encontrado rentable tomar a todos los sistemas ecosféricos (incluyendo el suelo) como estructuras de disipación (dinámicas y no lineales) forzadas a salir de sus estados de equilibrio, por variables de conducción.

Estas dos premisas conducen a una evolución de suelo más que a un desarrollo y proponen una multidireccionalidad de la pedogénesis (Huggett, 1998). Entonces, se ve al funcionamiento del suelo desde un punto de no-equilibrio termodinámico (en contraste con Jenny), ya que considera al suelo como un complejo sistema abierto, de no-equilibrio, el cual recibe y libera constantemente materia y energía que lo lleva a un estado quasi-estable o de equilibrio dinámico en el tiempo. Además, se considera al suelo como un sistema sinérgico y dinámico, capaz de responder al cambio, dentro de

una “dinámica entrópica” (Smeck, 1983; citado por Calero 2005), que obedece a la nueva situación impuesta por las variables formadoras de suelo (como la omnipresente inconstancia de las condiciones ambientales), auto-organizándose a una nueva situación de equilibrio (Phillip, 1993; Targulian y Krasilnikov, 2007; Huggett 1998).

#### **II.4 Procesos pedogenéticos específicos**

Los procesos de formación de suelo no solo dependen de los factores formadores, sino de un sistema más complejo: *Factores formadores de suelo ---- Funcionamiento interno del sistema suelo ---- Procesos pedogenéticos específicos ---- Propiedades y características del suelo ---- Funcionamiento externo del suelo* (extensión del modelo de Gerasimov, 1973, por Krasilnikov, 2000; Targulian, 2005; citados por Targulian y Krasilnikov, 2007).

Los factores formadores determinan el funcionamiento interno del suelo ya que afectan los flujos, ciclos, reacciones de intercambio, etc. del sistema multifase compuesto por las fases gaseosa y líquida, que fácilmente se renuevan por el intercambio con el ambiente y la biota (de acuerdo a Lovelock, 1979; citado por Targulian y Krasilnikov, 2007) así, transforma y regula el ambiente abiótico; y la fase sólida que está conformada por la litomatriz y el micro-sólido resultante (pedomatriz) de la pedogénesis. La alteración de la litomatriz en pedomatriz es el resultado de la respuesta del sistema a un nuevo estado más estable. Este sólido residual, producto de la multifase del suelo, es precisamente el que da cuerpo al suelo (al formarse, ser seleccionado, acumularse y diferenciarse) y da lugar a la horizontalización que es la firma *in situ*, expresada en un complejo registro de memoria del suelo, la cual contiene la información en el micro-sólido resultante de la pedogénesis ocurrida, si ésta es entendida como la integración de los diversos procesos pedogenéticos específicos, capaces de crear un paquete definido de fase-sólida pedogenética (Targulian y Krasilnikov, 2007; Targulian y Goryachkin, 2004).

La tabla 1 muestra algunos de los procesos pedogenéticos específicos, y su esencia, en Rusia y USA.

**Tabla 1. Procesos pedogenéticos específicos en Rusia y USA (Targulian y Krasilnikov, 2007).**

Rusia (Targulian, 2005)	Esencia	USA (Bockheim and Gennadiev, 2000)
Formación de Litter	Acumulación de detritos de materia orgánica pobremente descompuesta, sobre la superficie del suelo en condiciones aeróbicas	--
Formación de turba	Acumulación de detritos de materia orgánica pobremente descompuesta, sobre la superficie del suelo en condiciones anaeróbicas	Paludización
Humificación	Transformación de detritos de materia orgánica a específicos compuestos húmicos de color negro	Melanización
Gleyzación	Reducción de Fe y Mn en condiciones anaeróbicas, en suelos saturados con agua	Gleización
Salinización	Acumulación de sales solubles en el suelo	Salinización
Pedoturbación	Turbación del material del suelo por varios factores bióticos y abióticos (bio-crio-vertiturbación)	Crioturbación
Estructuración	Formación de estructura del suelo a partir del material parental	--
Cementación	Cementación del suelo por varios compuestos (Fe, Si, Ca)	Silicificación
Calcificación	Acumulación de Ca(Mg)CO <sub>3</sub> in el suelo	Calcificación
Podzolización	Lixiviado de Fe, Al y humus, desde el horizonte superior y acumulado en los horizontes inferiores	Podzolización
Lessivage	Translocación de arcilla de un horizonte superior a los inferiores	Argiluviación
Fersialitización	Transformación del material del suelo <i>in situ</i> , con moderada desilificación: formación de arcillas 2:1	--
Ferralitización	Transformación del material del suelo <i>in situ</i> , con fuerte desilificación: formación de arcillas 1:1 y hidróxidos-óxidos de Fe y Al	Ferralitización

Ahora, los diversos procesos pedogenéticos específicos que determinan las características y propiedades de un suelo, deben tener una duración y un límite en el tiempo, en donde lleven al suelo a una madurez, alcanzando un estado de equilibrio dinámico (Targulian y Krasilnikov, 2007). Surge la pregunta, ¿éstos procesos pedogenéticos específicos, van a la par en el tiempo o cada uno requiere de un tiempo específico, para alcanzar su equilibrio dinámico?

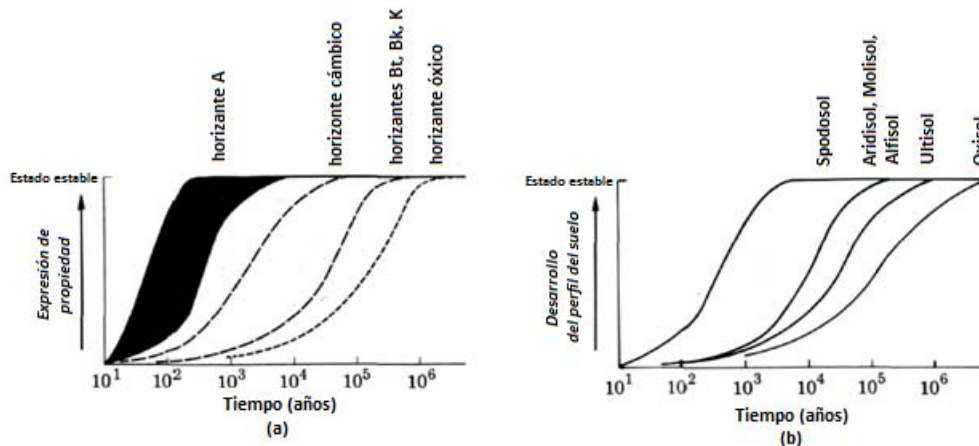
## II.5 Tiempos característicos

Para poder entender el impacto que tiene el tiempo en el desarrollo y evolución del suelo es necesario considerar el modelo Hegeliano de tiempo: este modelo tiene forma

de espiral, donde un mismo punto en el ciclo (momento) jamás se repite, pues siempre avanza hacia adelante sin reversibilidad.

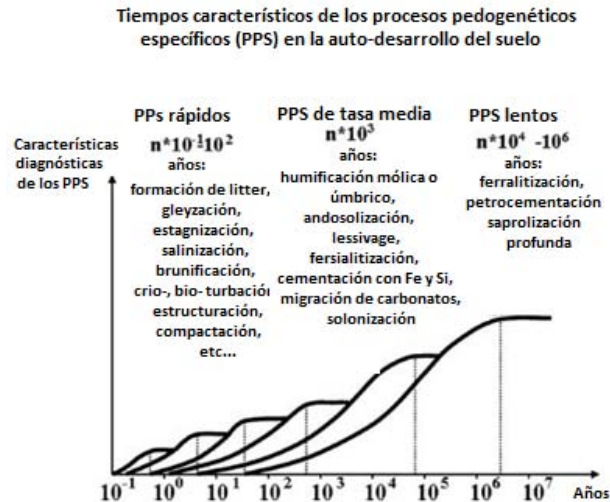
El concepto de tiempo característico de los procesos formadores de suelo fue propuesto por Armand y Targulian (1974), y postula la co-existencia en el suelo de procesos de diferentes escalas temporales: rápidos, de tasa media y lentos. Entonces, el tiempo característico de los procesos pedogenéticos (Targulian y Sokolov, 1978; Arnold et al., 1990; citados por Targulian y Krasilnikov, 2007), es el tiempo medio requerido para alcanzar el estado estable finito o quasi-equilibrio con el ambiente; y para la producción de características estables del suelo (Targulian y Krasilnikov, 2007).

El tiempo necesario para alcanzar el estado estable variará de acuerdo al material parental, la erosión, las propiedades y el tipo de perfil del suelo que se forma en un ambiente particular dado por un clima variante, en pequeña o gran magnitud. Por ejemplo, un horizonte A se forma más rápidamente en comparación a un B (fig.1a), cuyas propiedades se desarrollan con mayor lentitud. Un perfil de suelo es la suma total de varias propiedades, así que un perfil está en estado estable cuando sus propiedades diagnósticas han alcanzado este estado (fig. 1b) (Birkeland,1984).



**Figura 1. Diagrama esquemático, en donde se muestran las variaciones en el tiempo para alcanzar el estado estable. (a) Varias propiedades del suelo. (b) Varios órdenes de suelo. (Birkeland,1984).**

Así, diferentes suelos alcanzan su equilibrio dinámico (madurez) en diferentes tiempos. Targulian y Goryachkin (2004) proponen una división de los tiempos características con base en la velocidad con la que ocurren los procesos pedogenéticos específicos, ésta es: los rápidos ( $10^{1-2}$  años), los de tasa media ( $10^{3-4}$  años) y los lentos ( $10^{5-6}$  años) (ver fig. 2).



**Figura 2. Tiempos característicos de los procesos pedogenéticos en el auto-desarrollo del suelo (Targulian y Krasilnikov, 2007).**

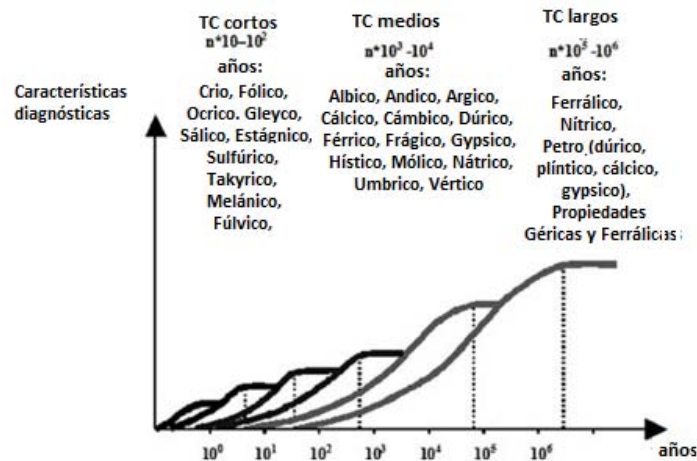
La figura 2 muestra los intervalos de tiempo en los que se dan ciertos procesos pedogenéticos específicos, por ejemplo entre los de rápido desarrollo que van de 10 a 100 años, se encuentra la formación de litter, la gleyzación, la salinización, la brunificación, la formación de estructura, entre otros. Los de tasas de desarrollo medias, que van de los 1,000 a los 10,000 años, están la humificación, la fersialitización, la migración de carbonatos, la cementación por Fe y Si, etc. Los de desarrollo lento, que van de los 10,000 a 1,000,000 años, incluyen la ferralitización, petrocementación, profunda saprolitización, etc.

Existen otros procesos de mayor rapidez, en escalas de tiempo de  $10^{-3}$  a  $10^2$  años de acuerdo a Arnold et al. (1990): procesos de la fase gaseosa, que va de  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$  años, esto es de días a meses; de la fase líquida que va de  $10^{-2}$  a  $10^0$  años, esto es



de meses a un año; de la micro- y macrobiota que va de  $10^{-1}$  a  $10^2$  años, esto es de meses a 100 años; y de la fase sólida que ya conocemos.

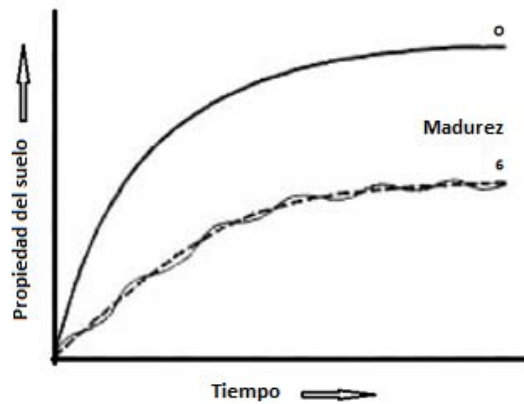
Ya que se tienen las pautas de desarrollo en el tiempo de los procesos, se puede obtener la tasa de desarrollo de los horizontes y sus propiedades (fig. 3) (Targulian y Krasilnikov, 2007).



**Figura 3. Tiempos característicos (TC) de los principales horizontes y propiedades de diagnóstico y usados en la WRB (Targulian y Krasilnikov, 2007).**

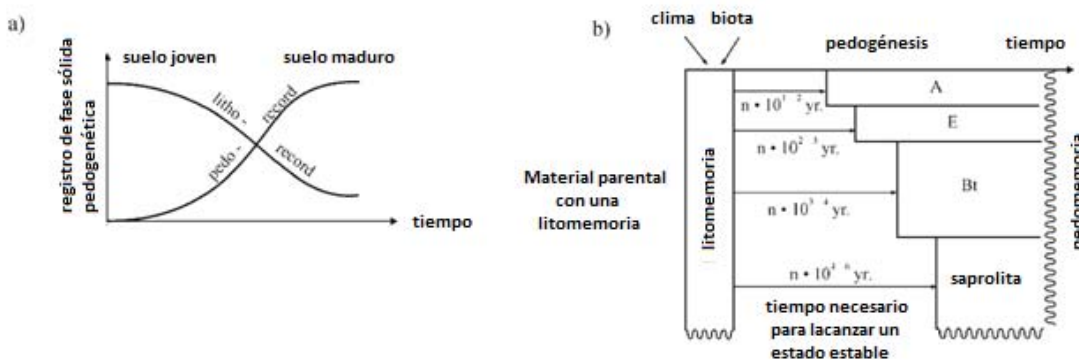
Sin embargo, se debe tener cuidado al establecer temporalidades en los procesos del suelo ya que éste tiene una estrecha dependencia del clima local y otras condiciones ambientales. Además, también dependen del resto de los factores formadores, es decir, se pueden registrar suelos viejos que presentan procesos de tasa rápida y suelos jóvenes muy desarrollados (Calero, 2005).

¿Pero cuál es la dinámica expresada en estas gráficas del suelo? Jenny (1941) describe la curva de comportamiento de propiedades, horizontes diagnósticos y suelos, para alcanzar su estado estable. La pendiente de la curva es positiva y en un principio pronunciada, luego se vuelve casi horizontal indicando un estado de quasi-equilibrio (fig. 4).



**Figura 4.** Ilustración esquemática de la variación de una propiedad del suelo con el tiempo. La curva de arriba es la ideal en donde se llega a una madurez (o). la curva de abajo (6) indica una propiedad del suelo que está sujeta a las periódicas fluctuaciones, tal como las variaciones estacionales (Jenny, 1941).

Sin embargo, dentro de esta curva ideal, se presentan variaciones cíclicas (fig. 4) que se comportan de acuerdo al tiempo Hegeliano, y en cada variación el reactor suelo acumula la memoria pedogenética (Targulian y Krasilnikov, 2007). De esta manera, cada vez la litomatriz se va perdiendo y la pedomatriz aumenta (fig. 5a), a diferentes tasas de tiempo (fig. 5b) (Targulian y Goryachkin, 2004).



**Figura 5.** Interrelación entre litomemoria y pedomemoria: a) Concepto generalizado de los tiempos característicos de la pedogénesis; b) cambio de litomemoria a pedomemoria en el tiempo (Targulian y Goryachkin, 2004).

De esta manera, el destino de un suelo en el tiempo geológico a escala de  $10^4$  a  $10^6$  años (tiempo suficiente para que surjan cambios sustanciales en el suelo), puede ser que, permanezca en *estado estable* mientras no exista un cambio esencial que lo obligue a auto organizarse y entonces *evolucionar*, o también que el suelo sea sometido a eventos de *enterramiento* o *denudación* (Targulian y Krasilnikov, 2007).

En cuanto a los suelos enterrados, referido a paleosuelos, Targulian y Krasilnikov (2007) reconocen que su estudio muestra claramente que los cambios ambientales pueden modificar significativamente, en un corto tiempo, las vías de desarrollo del suelo. Por lo tanto, un porcentaje alto de suelos son poligenéticos debido a variaciones temporales del pedoambiente.

Haciendo una reflexión de los procesos pedogenéticos específicos y sus tasas de desarrollo a través del tiempo, es importante reconocer la diferencia entre evolución y desarrollo de suelo. Sin embargo, es preciso saber que estos dos términos son de una calidad “simbiótica” pues son intrínsecamente necesarios el uno para el otro, ya que en la duración de un proceso se expresa el desarrollo, es decir, se dice que se desarrolla tal o cual proceso, pero si se da un cambio de parte de cualquiera o algunos de los factores formadoras dependientes, entonces el suelo es obligado a responder de una manera sinérgica, lo que lleva a una evolución, esto es una alteración en la pedogénesis que regía antes del cambio y a la par el surgimiento de nuevos procesos específicos.

## **II.6 Cronosecuencias: concepto y clasificación**

Las superficies geomorfológicas se modelan a través del tiempo por diversos factores, reflejándose en el paisaje y su evolución, en rangos de tiempos que van entre  $10^{-n}$  a  $10^n$  años (Gutiérrez, 2008). En algunas geoformas se desarrollan (en distintos grados) y evolucionan (sinergia) suelos cuyo grado depende del tiempo de estabilidad de sus factores formadores (Targulian y Krasilnikov, 2007). Es por esto que la historia de la

evolución del paisaje está íntimamente vinculada con la historia del desarrollo del suelo (McFadden y Knuepfer, 1990; citado por González et al., 2007).

Un concepto clave para el estudio de la relación geomorfología-suelos, se ha basado en el modelo de las cronosecuencias (González et al., 2008), no solo para entender dichas relaciones, sino para estudiar al tiempo como un factor formador de suelos (Stevens y Walker, 1970). La edad de la geoforma nos permite conocer la edad relativa de inicio de la pedogénesis (Jenny 1941; citado por Stevens y Walker, 1970). A propósito, Jenny (1941) definió una cronosecuencia como una colección de suelos relacionados en un área geográfica, que difieren primariamente como resultado del factor formador tiempo.

Stevens y Walker (1970) dan una definición encontrada en “The Glossary of Soil Science Terms (1965):

*“More specifically, a chronosequence may be defined as a sequence of soils developed on similar parent materials and relief under the influence of constant or ineffectively varying climate and biotic factors, whose differences can thus be ascribed to the lapse of differing increments of time since the initiation of soil formation.”*

La definición expone a los factores formadores como los elementos en común de cada suelo que integra la cronosecuencia, bajo la influencia del tiempo que es precisamente la variable. Un punto que llama la atención es cuando habla sobre el factor clima, pues dice *“under the influence of constant or ineffectively varying climate”*, lo cual deja ver, bajo la frase *“constante o ineficazmente variable”*, algo de lo que Huggett (1997) propone como la nueva visión evolucionista de la pedogénesis. En ella, los supuestos factores formadores, que supone la constante en la ecuación, realmente tienen variaciones, lo que lleva, de acuerdo a Birkeland (1990) y Gerrard (1992) citados por Huggett (1997), a una dificultad en la construcción e interpretación de las cronosecuencias.

En particular, es altamente improbable que el clima tenga constante estabilidad, incluso en periodos cortos. La topografía y la vegetación tampoco permanecen sin cambios por milenios o más (Huggett, 1997). Esto no significa que no se pueda establecer una cronosecuencia, solo se deben tomar precauciones al reconstruir e interpretar.

Una forma más segura de construir cronosecuencias geográficas de suelo (una manera de clasificación de cronosecuencias) según Huggett (1997), es usar suelos desarrollados en superficies de edad conocida.

Un parámetro importante es la confiabilidad de una cronosecuencia, que está dada por las cronofunciones. Jenny; citado por Stevens y Walker (1970), habla de cronofunciones cuando las propiedades del suelo y sus edades absolutas son conocidas, mientras que, si las edades son relativas, se habla de cronosecuencias.

Una cronofunción es la magnitud de cualquier propiedad o propiedades del suelo que están funcionalmente relacionadas con el tiempo, y sujetas a las variaciones de los demás factores formadores (Stevens y Walker, 1970). La ecuación de una cronofunción (Jenny, 1961; citado por Stevens and Walker, 1970) es:

$$S = f(T_{cl,o,r,p,...})$$

En donde, cl= clima, o= organismos, r= relieve, p= material parental, (...) = otros factores y todos son evaluados por T= tiempo.

De esta manera, se puede jugar con las variables poniendo las demás en función de una. Llamándolas climofunciones, biofunciones, topofunciones, litofunciones y cronofunciones, cuyas ecuaciones (Jenny, 1941; que retoma Yaalon, 1975) son:

$s = fcl$  (clima)  $o, r, p, t, \dots$   
 $s = fo$  (organismos)  $cl, r, p, t, \dots$   
 $s = fr$  (topografía)  $cl, o, p, t, \dots$   
 $s = fp$  (material parental)  $cl, o, p, t, \dots$   
 $s = ft$  (tiempo)  $cl, o, r, p, \dots$

Cada una de estas funciones corresponde a climosecuencia, biosecuencia, toposecuencia, litosecuencia y cronosecuencia, respectivamente.

Una manera de clasificar las cronosecuencias es de acuerdo al tipo de superficie terrestre, producto de procesos antropogénicos, eólicos, aluviales y superficies de depósito glacial (Stevens y Walker, 1970). Esta clasificación es conocida como *cronosecuencia de suelos geográfica* la cual se basa en una técnica comparativa geográfica (Rode, 1961; citado por Huggett, 1997), que consiste en un conjunto de suelos identificados, ya sea por sucesión vegetal, la cual tiene por debilidad que la edad dada a los suelos dentro de la geoforma está basada en una conjetura e inferencia (Rode, 1961; Vreeken, 1975; citados por Huggett, 1997; y Huggett, 1997), pero con las precauciones necesarias es de gran ayuda para una primera aproximación en la determinación de la cronosecuencia; y por la identificación de geoformas, lo que implica intuir el geosistema y reconocer los procesos que lo modelan, para poder establecer niveles de geo-formación y con ello los suelos desarrollados (Huggett, 1997). Ejemplos de estas cronosecuencias son morrenas glaciares, dunas de arena, cicatrices de deslizamientos, flujos de lava, paisajes fluviales (abanicos, planicies de inundación y terrazas), parches de vegetación quemados, terrazas marinas, flujos de tierra o lodo, depósitos de loess, pasturas viejas y zonas mineras antiguas (Huggett, 1997).

Pero no solo se pueden establecer cronosecuencias con un patrón horizontal, sino también vertical (Stevens y Walker, 1970). Vreeken en su trabajo de 1975 (citado por Birkeland, 1984; y Huggett, 1997), identifica cuatro modelos de cronosecuencias, marcando de manera importante la lógica del tiempo en cuanto al inicio y el fin del proceso de desarrollo y/o evolución en los suelos. Este autor considera suelos, cuyo

tiempo de inicio o término de pedogénesis es el mismo, llamándolo *tiempo isócrono*; y suelos que no comienzan o terminan en un mismo tiempo, denominado *tiempo transgresivo*. También considera si tiene superposición histórica temporal o no, esto para distinguir cronosecuencias verticales, ya que éstas no tienen superposición histórica.

De esta manera clasifica a las cronosecuencias en: las **Post-incisivas**, las **Pre-incisivas**, las **Tiempo-transgresivas sin superposición histórica** y las **Tiempo-transgresivas con superposición histórica**. El término “incisivas” se refiere a la incisión (intervención), geomórfica o humana, en la superficie terrestre que sepulta viejas superficies, o crea nuevas superficies, o ambas.

Las cronosecuencias post-incisivas son aquellas en la que el tiempo de inicio de la pedogénesis (tiempo cero), en cada suelo de la cronosecuencia, es transgresivo y el tiempo de término es isócrono (fig. 6), ya sea que el factor “stop” sea por el tiempo actual. Son el resultado de eventos post-incisivos que producen una secuencia progresiva de superficies cada vez más jóvenes, en las que se desarrolla suelo. Es el tipo de cronosecuencias más estudiada, por ejemplo: terrazas aluviales, cordones litorales etc.

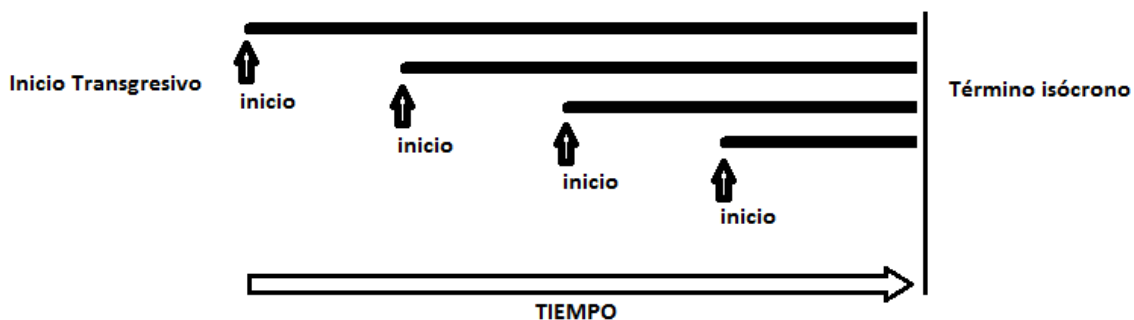


Figura 6. Esquema de cronosecuencias post-incisivas (Schaetzel y Thompson, 2015).

Las cronosecuencias pre-incisivas se caracterizan por tener suelos cuyo tiempo de inicio de pedogénesis es isócrono y su término es tiempo-transgresivo (fig. 7). Estos

son suelos que comenzaron al mismo tiempo la pedogénesis, pero fueron posterior y sucesivamente enterrados por algún evento pre-incisivo.

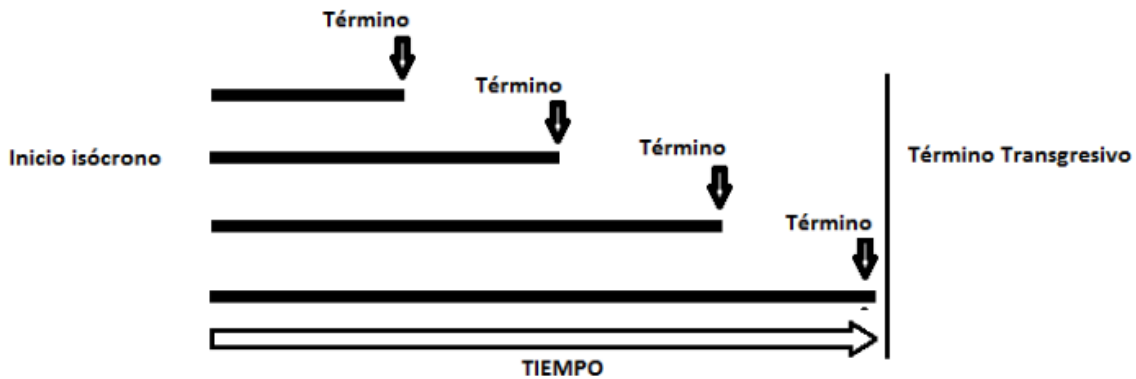


Figura 7. Esquema de cronosecuencias pre-incisivas (Schaetzl y Thompson, 2015).

Las cronosecuencias tiempo-transgresivas sin superposición histórica, son cronosecuencias verticales de suelo, en las que su inicio y término, de pedogénesis, son transgresivos (fig. 8), además de no contemporáneos, conformada por una superposición de suelos enterrados y sedimentos.

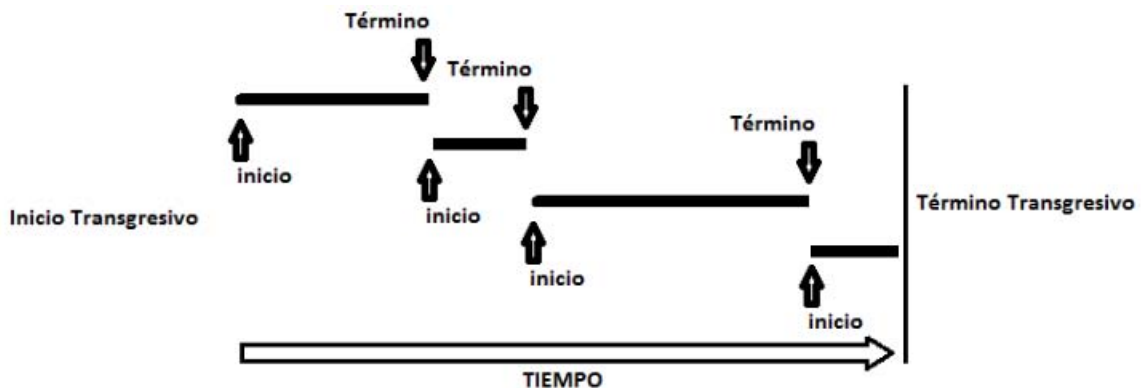
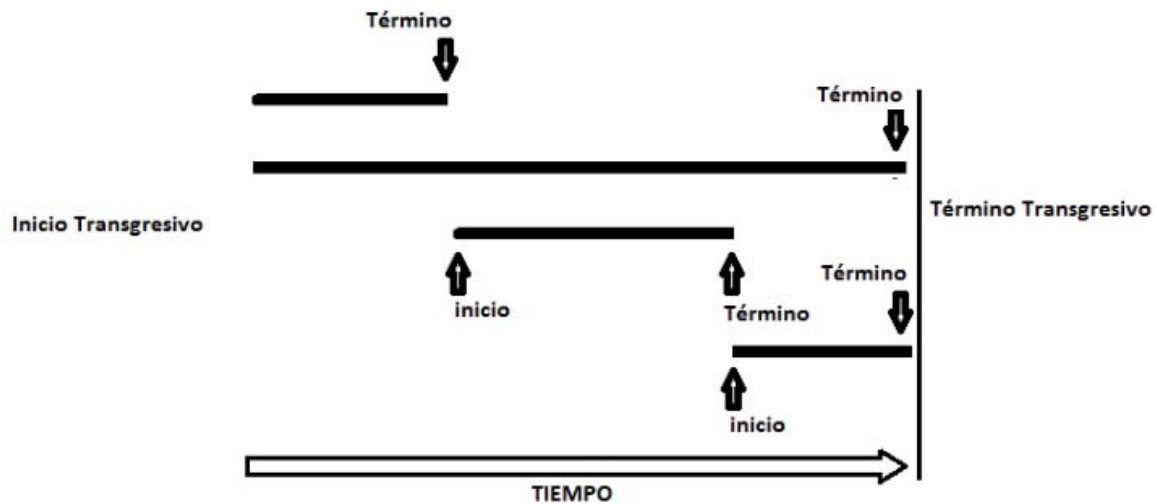


Figura 8. Esquema de cronosecuencias Tiempo-transgresivas sin superposición histórica (Schaetzl y Thompson, 2015).

Las cronosecuencias tiempo-transgresivas con superposición histórica, se conforman por suelos cuyo inicio y término de desarrollo son transgresivos, pero contemporáneos (fig. 9). Son muy complicadas ya que integran aspectos de las tres



anteriores. Es una secuencia con depósitos de distintas edades que sufren distintos enterramientos en distintos momentos.



**Figura 9. Esquema de cronosecuencias Tiempo-transgresivas con superposición histórica (Schaetzl y Thompson, 2015).**

Otra manera de clasificar las cronosecuencias es de acuerdo a su temporalidad, es decir, si pertenecen a una edad muy reciente o si son del Holoceno o del Cuaternario (Calero, 2005).

Entonces, el estudio de cronosecuencias puede abordarse al menos desde dos perspectivas. Una de ellas intenta deducir funciones (gráfica o matemáticamente) lineales o no lineales que representan el valor de una propiedad del suelo frente al tiempo, que da lugar a cronofunciones (Bockhein, 1980; Yaalon, 1975); esta aproximación requiere una datación absoluta (o cuanto menos, lo más precisa posible) de la edad del suelo. La otra aproximación se basa en la comparación del valor de cualquier propiedad edáfica con respecto al valor de la misma en el material parental (Busacca, 1987), siendo un método de datación relativo. Esta comparación puede conducir al establecimiento de índices de evolución. Normalmente, los investigadores intentan combinar ambas aproximaciones, explicando la falta de exactitud de las dataciones, con el estudio exhaustivo de propiedades e índices de evolución y/o desarrollo (Calero, 2005).

## II.7 Indicadores de pedogénesis en cronosecuencias

Conforme avanza el tiempo, y los suelos se encuentren sin factor que frene su formación, se pueden ir identificando a lo largo de la cronosecuencia una serie de indicadores que dan luz sobre la dirección y constante aumento de la pedogénesis.

Tales indicadores, son esenciales para distinguir las diferentes etapas de desarrollo y evolución de los suelos que conforman la cronosecuencia, lo que supondría: suelos de menor edad contienen procesos pedogenéticos de mayor velocidad, por tanto, son suelos de menor desarrollo; por otro lado, suelos de mayor edad presentan procesos de pedogénesis de menor velocidad, lo que nos lleva a suponer que son suelos más desarrollados.

Para interpretar un evidente desarrollo y evolución dentro de los suelos de la cronosecuencia, se puede *prestar atención a las cronofunciones* (Sauer, *et al.*, 2008; 2010; 2012; Vidic, 1998; Tsai, *et al.*, 2010; Scarciglia, 2006; Schaetzl y Thompson, 2015), de:

1. La materia orgánica: se acumula-humifica y aumenta con el tiempo, hasta llegar a un punto de equilibrio dinámico. Además, conocer su tasa de desarrollo en el tiempo ayuda a comprender mejor la dinámica de acumulación.
2. Los óxidos de Fe neoformados: ver las cronofunciones de Fe extraído con ditionito ( $Fe_d$ ), el cual nos indica la cantidad de Fe producto de la pedogénesis y el Fe extraído con oxalato ( $Fe_o$ ), que nos muestra el Fe relativamente recién neoformado aún no cristalino. Entre más desarrollado sea el proceso, la tendencia del  $Fe_d$  es a aumentar y la del  $Fe_o$  a disminuir. Esto se explica, ya que si  $Fe_o$  es el valor de Fe cuasi-cristalino (o llamado amorfo), y  $Fe_d$  es de todo el Fe producto de pedogénesis, entonces para saber cuánto Fe cristalino se tiene (que es indicador de mayor madurez de este proceso), sólo es necesario restar el  $Fe_o$  al  $Fe_d$ . Por otro lado, es importante utilizar las relaciones  $Fe_o/Fe_d$  y

$Fe_d/Fe_t$  y compararlas entre sí. La relación  $Fe_d/Fe_t$  informa sobre cuanto Fe producto de la pedogénesis hay con respecto al Fe total (en minerales primarios y secundarios), siendo entonces esta relación un buen indicador, tanto en perfil como en cronosecuencia, del grado de desarrollo de pedogénesis. Por su parte,  $Fe_o/Fe_d$  da luz sobre la cantidad de Fe cuasi-cristalino que hay en relación a todo el Fe producto de la pedogénesis. De esta manera, al compara ambas relaciones podemos ver en dónde el desarrollo de óxidos de Fe pedogenéticos es más consistente y estable y en donde no. Por ejemplo, sí el valor de  $Fe_d/Fe_t$  es alto, podríamos pensar, que es un proceso con mayor tiempo y madurez en donde hay una considerable producción de óxidos de Fe cristalino que nos da una cierta estabilidad en el proceso y por tanto mayor pedogénesis, sin embargo, al ver el valor de  $Fe_o/Fe_d$  encontramos que también es alto y nos indica que  $Fe_d/Fe_t$  es alta, no por tener dominancia de Fe cristalino, sino porque la mayor parte de Fe producto de la pedogénesis es Fe quasi-cristalino que determina una fase inicial y aún inmadura de la formación de suelos. También, es importante considerar las tasas de acumulación de las cronofunciones de  $Fe_d$  y  $Fe_o$ .

3. La arcilla neoformada: la tendencia de la cantidad de arcilla a lo largo de la cronosecuencia nos indica el avance de la pedogénesis, ya que la neoformación de filosilicatos va acompañada de un intemperismo pedogenético más intenso. Entonces, entre mayor sea la cantidad de arcillas mayor es la pedogénesis. Para apoyar lo anteriormente dicho, se toma en cuenta el tipo de arcilla que se encuentra en los distintos suelos de la cronosecuencia, así como su cantidad específica o relativa de acumulación, pues de acuerdo al tipo de arcilla es el tiempo y grado de afectación de los factores formadores, que se traduce en una interpretación de avance de pedogénesis. Así, se pueden tener sólo filominerales primarios como las muscovitas, luego arcillas 2:1 como illitas, vermiculitas, esmectitas, montmorillonitas, y finalmente caolinitas o haloisitas que son 1:1, esto nos indica un avance en la pedogénesis ya que suelos con

arcillas 1:1 son los más desarrollados en cuestiones pedogenéticas. También, es de gran utilidad considerar las tasas de acumulación.

## **II.8 Pedogénesis en ambientes tropicales**

Un clima tropical húmedo es el que se desarrolla en las zonas cercanas al ecuador, entre los trópicos a latitudes de 23º norte y 23º sur, con una temperatura promedio de 18ºC para el mes más frío, por lo que puede carecer de estacionalidad marcada. Se caracterizan por tener en su mayoría lluvias intensas todo el año, aunque pueden haber pequeños periodos de sequía. Esto depende también de la ubicación orográfica. De acuerdo a esta variantes el clima se puede diversificar en sub-unidades (Clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García, 1986).

De esta manera, el desarrollo del intemperismo formador de suelo, en este tipo de clima, se hace más intenso y agresivo, ya que el motor principal de dicho proceso es la variable climática. Al potencializar el factor climático, aumentando la temperatura y la precipitación, y prolongándolo en la mayoría del año, se propician periodos largos de pedogénesis de alta intensidad. Provocando, un profundo intemperismo y lixiviación, que dependiendo de las subunidades climáticas tropicales, es la intensidad. Afectando propiedades del suelo como capacidad de intercambio catiónico efectivos (ECEC), fósforo extractable, la cantidad de minerales intemperizables, silicio y bases intercambiables que tienden a perderse (Takana, *et al.* 1989; citado por Schaetzl y Thompson, 2015) y por consecuencia el pH a acidificarse. Por el contrario la cantidad de arcillas 1:1 y minerales como gibbista, hematita, goethita, maghemita y minerales de Ti (principalmente ilmenita y anatasa), tienden a aumentar (Schaetzl y Thompson, 2015).

Dentro de esta tendencia a perder-aumentar propiedades y características de los suelos, y como ya dijimos, dependiendo de la subunidad de clima tropical Schaetzl y Thompson (2015), proponen las tres fases de desarrollo de suelos en climas cálidos de

Philippe Duchaufour, 1982, las cuales no necesariamente se producen en serie, sino que son una climosecuencia que se lleva de climas de latitudes medias a tropicales.

### **II.8.1 Clima mediterráneo cálido - Fersialitización**

En este clima, la estación lluviosa es en invierno con un aproximado de 1000 mm, con una temperatura de entre un poco mayor a 0° y -18°C. Con un verano cálido seco que puede sobrepasar los 22 °C (de la clasificación de Köppen).

Con estas características el proceso pedogenético dominante es el de fersialitización, el cual consiste en la neoformación de arcillas 2:1 como la esmectita y movilización de óxidos de Fe. Por ser un clima estacional, el suelo tiene elementos alcalinos que aumentan el pH lo cual regula el impacto del intemperismo. Se pierde poco sílice y las bases intercambiables se mantienen altas. El lessivage (translocación de arcillas), forma horizontes Bt, horizonte en el que se acumula el Fe neoformado. También se desarrolla un horizonte A de buen espesor. El común de los suelos que se desarrollan con estos procesos a esta intensidad son los luvisoles por la WRB (Word Reference Base) y alfisoles por la STB (Soil Taxonomi Base) (ver fig. 10).

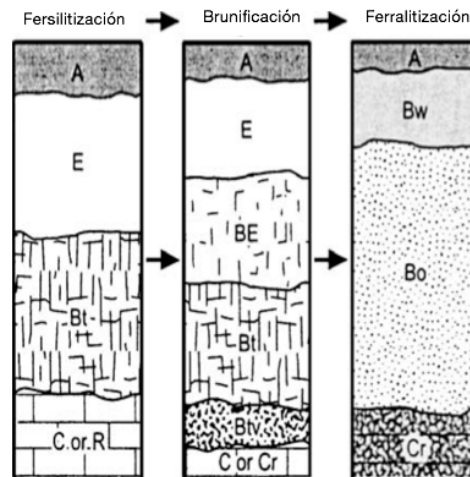
### **II.8.2 Clima subtropical - Brunificación**

De acuerdo a la clasificación de Köppen, este clima tiene una temperatura media anual de 18°C y en el mes más frío de 6°C. Las lluvias son estacionales coincidiendo con un verano caluroso, y varían de acuerdo a la orografía.

De esta manera, en proceso dominante es la brunificación. En éste, la influencia de una mayor temperatura y precipitación, potencia la intensidad del intemperismo, incrementando la acidez del suelo y propiciando una mayor pérdida de bases y desilificación, formando arcillas 1:1 como la caolinita. Se produce mayor cantidad de óxidos de Fe, aunque se mantiene una cantidad considerable de minerales primarios. La translocación de arcilla disminuye. Los suelos que se desarrollan bajo estas condiciones son los acrisoles de acuerdo a la WRB y ultisoles por la STB (ver fig. 10).

### II.8.3 Clima tropical húmedo – Ferralitización

La características climáticas fueron descritas al principio de este apartado 8. En donde encontramos como proceso pedogenético dominante la ferralitización. Dicho proceso, responde a lluvias intensas casi todo el año y a una temperatura cálida que prácticamente no permite estacionalidad. Esto potencializa al máximo el



**Figura 10. Diagrama conceptualizado de Duchaufour's (1982). Las tres fases de intemperismo y pedogénesis en climas cálidos (Schaetzl y Thompson, 2015).**

intemperismo tornando un pedo-ambiente ácido. La cantidad de bases intercambiables es muy poca. La mayoría del material es producto de la pedogénesis, como gibbsita, caolinita y óxidos de Fe neoformados. Los únicos minerales primarios que se encuentran son: en gran cantidad el cuarzo; y una pequeña cantidad de otros más resistentes como el rutilo, anatasa y zircón, dependiendo del material parental. La translocación de arcilla es muy baja casi nula debido a que no existe dispersión probablemente por la cementación de sesquióxidos (óxidos e hidróxidos de Fe, Al y Mn). Dichas características permiten la formación de un horizonte óxico muy uniforme. Los suelos característicos son los ferralsoles para WRB y oxisoles para las STB (ver fig. 10). En cuanto a la materia orgánica, el horizonte A es fuertemente ácido y se encuentra en poca acumulación ya que el clima permite la rápida degradación por parte de la micro y meso-fauna.

Podemos ahora, concluir que estos climas presentados, a excepción del tropical húmedo, independientemente del material parental no son capaces de llevar la pedogénesis a un estado de extrema oxidación y construir un ferralsol. Entonces únicamente un clima tropical húmedo puede presentar la formación de suelos ferrálicos.

## **II.9 Estudios de caso: cronosecuencias de suelos en clima tropical**

Como ya vimos, el único clima hasta ahora conocido, que es capaz de potencializar a un máximo al intemperismo pedogenético, es el tropical húmedo.

De esta manera, los suelos que se desarrollan en el trópico húmedo, son de los más evolucionados, por lo que sus atributos son prácticamente producto de la pedogénesis. No obstante, para llegar a este nivel de evolución se requiere de largos periodos de tiempo, pues los procesos, como la ferralitización, disponen de periodos de miles a millones de años, aún en condiciones constantes y adecuadas.

De acuerdo con estudios previos, podemos constatar los largos periodos de estabilidad en los que se forman estos suelos. Por ejemplo, en la isla Hainan, al sur de China, Zhang Gan-Lin, et al, en el 2007, analizan una cronosecuencia de suelos sobre un material parental de rocas basálticas, granitos y granodioritas, bajo un clima tropical con una temperatura de 23.3°C como promedio anual y una precipitación de 1,826 mm anuales. La temporalidad de la cronosecuencia va de los 10 mil años a 1.81 millones de años, con suelos tipo ferralsol. Entre los índices que utilizan para la caracterización resaltan los valores de  $Fe_d/Fe_t$ , el cual indica pedogénesis, mostrando una curva logarítmica en la que apenas a partir de los 25 mil años comienza a dar indicios de equilibrio dinámico.

Otro estudio, en este caso de propiedades magnéticas en ferralsoles, se llevó a cabo en el 2011 por Li, *et al.*, también en el sur de China, que tiene un clima tropical (23°-24°C de media anual y 1400 - 1800 mm de precipitación anual). En él se trazó una

cronosecuencia de suelos sobre basaltos, con una temporalidad de 10 mil años a 6.12 millones de años. Al comparar los resultados de los diversos análisis magnéticos, los autores llegan a la conclusión de que en los suelos más antiguos (ferralsoles) se tiene una mayor estabilidad en los parámetros magnéticos, no así en suelos relativamente jóvenes, en los que hay cambios rápidos. Además, comparan también las relación  $Fe_d/Fe_t$ , en donde ya se refleja un periodo de cuasi-estabilidad.

Por otro lado, está el estudio de Daniel R. Muhs (2001) de una cronosecuencia de suelos establecida sobre rocas superficiales de la isla Barbados, compuestas de calizas cuaternarias de terrazas de arrecifes de coral tectónicamente levantadas. Daniel R. Muhs (2001) estudia esta cronosecuencia y la establece para una temporalidad de 83 mil a 700 mil años. Dentro de los análisis revisa los máximos contenidos de arcilla en cada perfil de la cronosecuencia, evidenciando que aproximadamente a los 100 mil años la pedogénesis comienza un estado de cuasi-estabilidad.

Fisher G. B. y Ryan P.C. (2006) estudian una cronosecuencia de suelos en Costa Rica, del lado de la costa del Pacífico, la cual se establece sobre terrazas de relleno fluvial, con una temporalidad del presente a 125 mil años. Monitorean las concentraciones y cambios de las arcillas, especialmente la transformación de esmectitas a caolinitas por efecto de la pedogénesis. Establecen tres grupos, el primero es en las actuales llanuras de inundación que se encuentran activas, teniendo aquí el tiempo cero, en donde los filosilicatos dominantes son las esmectitas; el segundo grupo ya se encuentra en las terrazas y va de 5 a 10 mil años, marcando un equilibrio entre la cantidad de esmectitas y caolinita; por último, el tercer grupo que va de 10 a 125 mil año, en los que es evidente el dominio de la caolinita. Señalando inicio ya visible de la pedogénesis a partir de los 10 años.

Estos casos de estudio, en China, la isla de Barbados y Costa Rica, reflejan una coincidencia muy notable sobre la influencia del los climas tropicales húmedos en la formación de suelos altamente evolucionados, los cuales se caracterizan por largos periodos de desarrollo y evolución que suponen una cierta estabilidad en los factores



formadores. Además, de que la pedogénesis comienza a tener un impacto mayor a partir de los 10 mil años y a partir de este tiempo comienza a desarrollar etapas de madurez significativa, que sigue en proceso incluso hasta los 6 millones de años.

Es preciso hacer notar que los periodos que se establecen para las cronosecuencias son muy largos con una pedogénesis muy desarrollada y evolucionada, sin embargo, poco se conoce de las etapas iniciales de la pedogénesis en estos ambientes tropicales.

## CAPÍTULO III

### Materiales y métodos

#### III.1 Muestreo y análisis en campo

Los perfiles de los suelos se describieron en campo de acuerdo con lo establecido por la WRB (1998) y la FAO-UNESCO (1994) para la identificación, descripción y clasificación de horizontes a partir de sus características morfológicas, tales como profundidad, límite de horizonte, color (con la Carta de Colores Munsell (2002), en seco), textura, estructura, presencia de rasgos pedogénicos característicos (acumulaciones, concreciones, entre otros).

Una vez determinados los horizontes de cada perfil, se tomaron muestras totales por horizonte; algunos bloques-muestra inalterados, de zonas de interés, de horizontes y puntos de contacto o transición entre horizontes, para micromorfología; y muestras de cada 10 cm en todos los perfiles para susceptibilidad magnética.

#### III.2 Análisis de laboratorio

##### III.2.1 Textura

La textura se llevó a cabo conforme al método de separación y cuantificación de arcillas, limos y arenas de Jackson, et al., 1949, eliminando primero los agentes cementantes como materia orgánica utilizando peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) al 10%.

##### III.2.2 pH y conductividad eléctrica

El potencial hidrógeno de los suelos (pH) se determinó en una relación de suelo/solución 1:2.5 con agua destilada (ISRIC, 2002). Se pesan 20 g de muestra previamente tamizada (< 2 mm), posteriormente se afora en una probeta adecuada para 50 ml, con agua destilada. Luego se agitan las muestras por 20 minutos, en un agitador mecánico, cuya velocidad depende del tipo de muestra, hasta ver el enturbiamiento del agua destilada. Después, 30 segundos antes de medir la muestra, se agita. Finalmente, con un potenciómetro Conductronic pH 120, se mide el pH,

dejando que se estabilice por 1 min, para inmediatamente tomar lectura. Una vez medido el pH, se procede a leer conductividad eléctrica, de la misma muestra preparada.

### **III.2.3 Materia orgánica**

Para determinar la cantidad de materia orgánica en cada horizonte se decidió hacer el método por calcinación. Se pesaron 2 gramos de muestra total, luego se calentó en una estufa a 105 °C por 24 hrs, para quitar humedad; posteriormente se calcinó a 450 °C por 12 hrs, en una mufla Tube Furnace TF55030A-1, para consumir la materia orgánica; finalmente por diferencia de pesos se determina la cantidad que se perdió, lo que da el valor de la materia orgánica contenida en la muestra.

### **III.2.4 Densidad aparente**

Este análisis, se determinó hacer de la manera más convencional ya que, los suelos a estudiar son casi en su totalidad arenosos. De esta manera, se llenó a tres tiempos, una probeta de 50 ml, y para cada tiempo se aplicaban 20 golpes para compactar el material. Una vez que se tiene el peso de la muestra en un volumen de 50 ml, se hace una corrección de peso eliminando la humedad de la muestra a 110 °C, esto se hace hasta obtener peso constante. Posteriormente, se establece la relación masa/volumen (técnica desarrollada en el laboratorio de física de suelos del Instituto de Geología de la UNAM, a cargo del Dr. Rene Alcalá).

### **III.2.5 Susceptibilidad magnética**

Las muestras para susceptibilidad magnética y dependencia de frecuencia fueron homogeneizadas y colocados en cajas de acrílico de 8 cm<sup>3</sup> en un sensor dual Barnington MS2B. Se midió en alta y baja frecuencia (Braceinas-Cruz, 2015). La susceptibilidad nos muestra los horizontes con mayor cantidad de Fe y la dependencia de frecuencia nos indica el tamaño de partícula de las concentraciones de óxidos de Fe, lo que nos permite intuir si son pedogenéticos o minerales primarios (si las partículas son pequeñas nos indica que son producto de la pedogénesis o en caso de

sedimentos que son producto de procesos diagenéticos) (Dearing, *et al*, 1996; Worm, 1998).

### **III.2.6 Óxidos de Fe pedogénicos**

Los óxidos de Fe producto de la pedogénesis, se determinaron por extracción de ditionito-citrato-bicarbonato de sodio, y el Fe amorfo por extracción con oxalato de amonio. Ambos de acuerdo a la metodología de Mehra y Jackson, 1960.

### **III.2.7 Fluorescencia de Rayos X: Fe, K, Ti y Zr totales**

El Fe total, así como el K, Ti y Zr se midieron en el equipo de fluorescencia de rayos X NITON XL3t XRF analyzer, del laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología, UNAM.

### **III.2.8 Difracción de Rayos X: filosilicatos pedogénicos**

La fracción menor a 2 micras, es suspendida en agua y depositada en un portaobjetos de vidrio, al evaporarse el agua las arcillas quedan orientadas, listas para obtener su información en un difractograma, el cual se obtiene, con un difractómetro SHIMADZU XRD6000 equipado con tubo de Cu de foco fino, equipado con monocromador y filtro de Ni. Las mediciones fueron en escaneo continuo con una velocidad de  $2^\circ/\text{minuto}$  y un paso de  $0.02^\circ(2\ \text{theta})$ . Los difractogramas se midieron en fracciones orientadas según las tres rutinas que se indican a continuación: el primer agregado orientado de cada muestra se analizó sin tratamiento de 4 a  $70^\circ(2\ \text{theta})$ . El segundo agregado se trató con etilenglicol a  $70^\circ\text{C}$  durante 24h y se midió de 4 a  $30^\circ(2\ \text{theta})$ . El tercer agregado de cada muestra se calentó a  $550^\circ\text{C}$  durante 1h y se midió de 4 a  $20^\circ(2\ \text{theta})$ . En cuanto la interpretación de los materiales, se procesaron en dos software: High Score Plus Panalitical 4.0, 2013 y Fityk 0.9.8, M. Wojdyr, J. Appl. Cryst. 43, 1126, 2010 (laboratorio de difracción de rayos X, del Instituto de Geología, UNAM, a cargo de la Dra. Teresa Pi Puig).

### **III.2.9 Análisis micromorfológico**

Para este análisis se tomaron muestras inalteradas de suelo, las cuales fueron impregnadas a temperatura ambiente con resina MC-40, luego cortadas y desbastadas hasta un grosor de micras dando como resultado una lámina delgada. Posteriormente, se estudiaron en un microscopio petrográfico Olympus BX 51, en donde se observaron y describieron edaforasgos como matriz y rasgos pedológicos, entre otros, bajo la terminología de Brewer y Sleeman (1988), y Bullock, *et al.*, 1985.

### **III.2.10 Dataciones**

Las dataciones fueron proporcionadas por Nooren, *et al.*, 2014. Describe Nooren, que las muestras fueron tomadas cerca del nivel del freático, para “*optically stimulated luminescence*” (OSL). Por lo que las dataciones están establecidas para un momento antes del comienzo de la pedogénesis, en específico la última vez en que el sedimento muestreado dejó de recibir luz solar.

### **III.2.11 Procedimientos matemáticos y estadísticos**

El análisis de los datos se procesó en el programa Microsoft Excel 2011, en donde se realizaron gráficas y cálculos, en regresión lineal de tendencias: lineal, potencial, polinómica, exponencial y logarítmica. En algunos casos se calculó el error de correlación con la desviación estándar.

## **III.3 Área de estudio**

### **III.3.1 Delimitación del área de estudio**

Dentro de la gran Planicie Costera del Golfo de México, en el estado de Tabasco, se encuentran en el litoral una serie de cordones sucesivos de arena configurados en forma paralela a la línea de costa actual (Ortíz-Pérez, *et al.*, 2005). Son de edad Holocénica (de acuerdo a Nooren, *et al.*, 2014; Psuty, 1965; y Ortíz-Pérez, *et al.*, 2005) y se extienden desde el río Tonalá, Tabasco, hasta un poco más al noreste de la Laguna de Términos en Campeche, comprendiendo alrededor de 350 km (Aguayo, *et al.*,

1999). Forman una faja de 150 a 200 m en los complejos lagunares de Machona-Mecoacán, mientras que en las cercanías de la desembocadura del río Grijalva pueden tener hasta 25 km (Ortíz-Pérez, *et al.*, 2005). Este estudio se enfoca en los cordones litorales que se encuentran al lado oeste de la desembocadura del río Grijalva (fig. 11).

### III.3.2 Microrelieve: sistema de cordones

Geomorfológicamente, se distinguen tres sistemas de cordones (Psuty, 1965; Nooren, 2014): **A-** los pertenecientes al sistema fluvial Grijalva-Usumacinta, los cuales son los más recientes; **B-** los del sistema San Pedro y San Pablo-Usumacinta de edad intermedia; **C-** y los más antiguos que de acuerdo a Psuty, 1965, probablemente son los pertenecientes a un sistema fluvial que drenaba la Cuenca Central. Nooren, *et al.*, 2014, dan edades de formación de algunos cordones. Con tal información se pueden acotar edades aproximadas para cada sistema: el A del año 1050 d.C. al presente, el B del 1050 d.C. a <3,100 a.C., y el C de >3,100 a.C. (fig. 11).

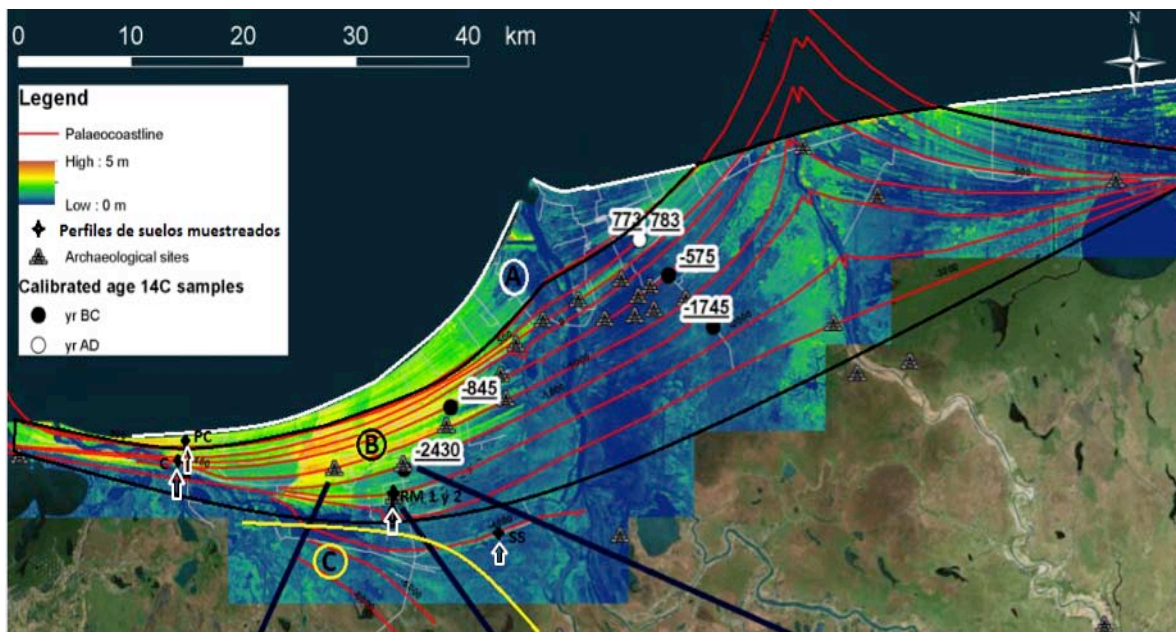


Figura 11. Se delimita el área de los sistemas de cordones A, B y C. Las flechas negras indican la ubicación de los cinco perfiles de suelo muestreados: Simón Sarlat (SS), Rancho Magdalena 2 (RM 2), Cocoterros (C) y Playa Cocoterros (PC). (La imagen con los cordones marcados así como los sitios arqueológicos y dataciones, son proporcionados por Nooren, *et al.*, 2014).

### III.3.3 Dinámica de formación de cordones

Estos cordones de edad geológica reciente, son la fase final de formación de la Llanura Costera de la cuenca de los ríos Grijalva y Usumacinta, los cuales han transportado sedimentos terrígenos desde la sierra de Chiapas (Aguayo, *et al.*, 1999; Ortíz-Pérez, *et al.*, 2005), pasando por terrazas miocénicas y las planicies fluviodeltaicas plio-cuaternarias (Ortíz-Pérez, *et al.*, 2005), que se formaron a partir del mismo material erosionado de la Sierra Chapaneca (Padilla-Sánchez, 2007). Desde la estabilización del nivel del mar actual (Psuty, 1965), los sedimentos aportados por el sistema deltaico Grijalva-Usumacinta, así como el transporte y depósito de sedimentos marinos y costeros acarreados por corrientes litorales, son retrabajados y depositados por el oleaje, las mareas, eólicamente y por corrientes generadas en tormentas (Aguayo, *et al.*, 1999), además de la fuerte influencia de las corrientes de aire fríos “Nortes”, los cuales contribuyen también, a la formación de los cordones (Psuty, 1965).

De esta manera, el tipo de material del que se forman los cordones está determinado por el paso de los ríos por el paisaje, que va recogiendo sedimentos. Los ríos Grijalva y Usumacinta nacen en el macizo de la Sierra de Chiapas o Sierra Madre de Sur la cual está constituida de los siguientes materiales rocosos: por la parte donde fluye el río Grijalva, por un complejo de rocas metasedimentarias del Precámbrico superior al Paleozoico inferior (Sedlock, *et al.*, 1993; citado por Padilla-Sánchez, 2007), intrusionado por granitos, granodioritas y tonalitas del Permotriásico (Pantoja, *et al.*, 1974; López-Infanzón, 1986; Pacheco y Barba, 1986; citados por Padilla-Sánchez, 2007), además de intrusivos del Cretácico Superior (Burkart, *et al.*, 1987; citado por Padilla-Sánchez, 2007); por la parte donde fluye el río Usumacinta, está constituida por rocas carbonatadas del Jurásico Tardío hasta el Paleógeno, y en las tierras altas en el sur, se componen de rocas metamórficas Paleozoicas, rocas ígneas extrusivas (andesitas y dacitas), productos piroclásticos y rocas sedimentarias (lutitas, areniscas y limolitas) cuyo rango de edades varían desde el Cretácico hasta el Cuaternario (Hernández-Santana *et al.*, 2012; citado por Solís-Castillo, 2014).

Cuando los ríos pasan por los sistemas de Terrazas Miocénicas y las planicies fluviodeltaicas plio-cuaternarias, se puede inferir que recogen en su mayoría arcillas y limos de los suelos ya desarrollados, así como materia orgánica. Es importante mencionar que, el río Grijalva tiene una longitud de 766 km con un escurrimiento promedio anual de 46,805 millones de metros cúbicos. Por su parte el Usumacinta cuenta con una longitud de 520 km y un escurrimiento medio anual de 58, 395 millones de metros cúbicos, siendo la cuenca de este último más grande que la del Grijalva (Velázquez, 1994).

Las corrientes marinas viajan normalmente con una dirección suroeste, a excepción del periodo de Nortes que es al este. Transportan sedimentos de la plataforma carbonatada de la Península de Yucatán, sin embargo su aporte es muy poco a los cordones del área de estudio, pues únicamente tienen el aporte de los mismos sedimentos terrígenos retrabajados de la zona (Márquez, 2011).

Así, se forma una plataforma de sedimentos principalmente arenosos, en donde Nooren, *et al.*, 2014, afirma que las arenas están conformadas predominantemente por sedimentos volcánico-clásticos.

### **III.3.4 Edafología en el área de cordones y planicie costera**

Estos cordones litorales se presentan como material parental para que actúe la pedogénesis y se formen suelos, determinados también por el clima y la vegetación. Cabe aclarar que el macrorelieve se considera como llanura con una altura promedio de 6 msnm, ya que la plataforma en su punto más alto es de 15 msnm y el más bajo de 1 msnm. De acuerdo a INEGI, 2005, los suelos dominantes en esta área son: los gleysoles en los cordones más cercanos a la playa; y arenosoles en el resto de los cordones. Complementando, Ortíz-Pérez, *et al.*, 2005, presenta un modelo (fig. 12) de toposecuencia de suelos, que va de los cordones, que son nuestra área de interés, pasando por los pantanos, hasta llegar a una serie de terrazas de edad miocénica (esto presentado en el apartado anterior). En nuestra área de estudio, identifica arenosoles



en los cordones cercanos a la playa, gleysoles entre los bajíos (“caños” entre cordón y cordón), regosoles en los cordones intermedios y cambisoles en los más lejanos a la playa. Fuera del área de estudio, pero no de menor interés, registra solonchaks, histosoles, fluvisoles, gleysoles, regosoles, cambisoles y vertisoles, estos últimos se presentan en las planicies fluvio-deltáicas altas.

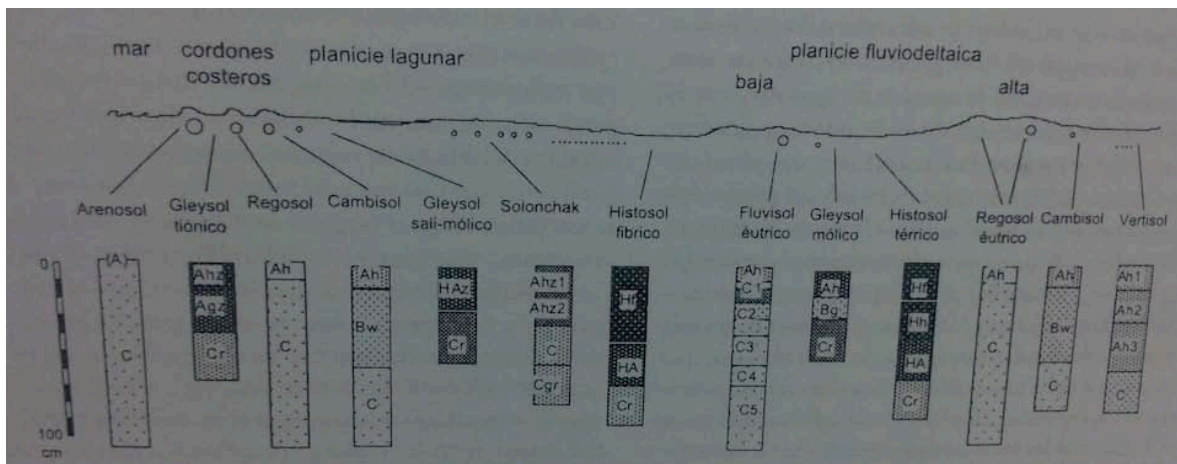


Figura 12. Modelo de toposecuencia de la planicie costera de Tabasco, por Ortiz-Pérez, *et al*, 2005

### III.3.5 Clima del área de cordones

El clima para la región es cálido húmedo con lluvias intensas en verano Amw”(i’g de acuerdo a la clasificación de Koeppen modificada por Enriqueta Gracia, 1986, con una temperatura media anual de 27°C siendo la mínima minimorum de 13°C y la máxima maximorum de 40°C. La precipitación media anual es de 1,800 mm y una evapotranspiración potencial media anual de 1,600 mm. La época de secas es de febrero a principios de junio, siendo junio el mes de mayor insolación con 13 horas-luz/día y diciembre el de menor insolación con 10.9 horas-luz/día. El periodo lluvioso de temporal es de mediados de junio a principios de septiembre. De octubre a enero se presentan los Nortes, propiciando lluvias otoño-invernales. La temporada de huracanes es de mayo a octubre, aunque casi ninguno llega a tocar tierras Tabasqueñas causando únicamente nubosidad y lluvias, pues el porcentaje de incidencia por huracanes con respecto al total del país es de 4%. Y se tiene una

variación de presión atmosférica entre 1,018 m.bar en enero (invierno) a 1,013 m.bar en julio (primavera) (Velázquez, 1994).

### **III.3.6 Vegetación de área de cordones**

Esta región a sido sujeta a importantes impactos ambientales en especial a cambio de uso de suelo desde culturas Mesoamericanas antiguas (800 a. C.) hasta la actualidad , en donde las selvas tropicales , manglares y humedales han sido alterados por la mano humana (Velázquez, 1994). Por lo que, en la actualidad se tiene una distribución en la vegetación de la siguiente manera: en los cordones más cercanos a la playa se encuentran cocotales; en cordones intermedios, algunos cocotales y grandes áreas de pastizal inducido con algunos manchones de selva; y tierra más adentro se tiene vegetación hidrófita como popal (*Thalia geniculata*), tular (*Typha*, *Scirpus*, *Cyperus*, *Phragmites* y *Cladium*) y pucté (*Bucida buceras* L.) (Ortíz-Pérez, et al., 2005; INEGI, 2005).

De esta manera, estos cordones litorales ofrecen la oportunidad de un estudio de cronosecuencia de suelos. Por lo que, los perfiles de suelo muestreados, se eligieron en lugares significativos y estratégicos, pues la catena además de tomar en cuenta la mayor cantidad de factores del ambiente, se basó en que se tenía que tomar los tres sistemas de condones A, B y C, aunque el perfil de suelo más antiguo, parece estar en la transición entre B y C.

## CAPÍTULO IV

### Resultados

En el entendido de que la presente tesis trata sobre una cronosecuencia, la manera de presentar los resultados será por atributo para los cuatro perfiles a la vez, ya que de esta forma se tendrá una visión amplia del avance de las propiedades-características de los procesos pedogenéticos a través del tiempo estimado para la cronosecuencia. Además, los perfiles se presentarán en un orden de menor a mayor edad, para apreciar el avance de cada atributo.

#### IV.1 Descripción de perfiles en campo

##### IV.1.1 Generalidades básicas y descripción morfológica de los perfiles de la cronosecuencia.

Se tienen cuatro perfiles de suelo, muestreados y caracterizados de acuerdo a la WRB, 1998: Simón Sarlat, Rancho Magdalena 2, Cocoteros y Playa Cocoteros. Con sus edades y coordenadas respectivas (tabla 2).

Tabla 2. Nombre de los perfiles muestreados para la cronosecuencia, con su clave, tipo de suelo de acuerdo a WRB (2014), edad BP (antes del presente, 1950) y coordenadas UTM.

Nombre del perfil	clave	Tipo de suelo	Edad BP	Coordenadas UTM (15Q)
<b>Playa Cocoteros</b>	PC	Regosol	35 años	501252 E ; 2037965 N
<b>Cocoteros</b>	C	Arenosol	1307 BP	500543 E ; 2036674 N
<b>Rancho Magdalena 2</b>	RM2	Arenosol	4397 BP	520554 E ; 2033323 N
<b>Simón Sarlat</b>	SS	Cambisol	5100 BP	529909 E ; 2030198 N


Sus características morfológicas descritas en campo, son:

##### *IV.1.1.1 Playa Cocoteros*

Este es el perfil más joven (tabla 3), ya que en uno de sus horizontes, se encontraron residuos antrópicos, actuales como hule espuma y un código de barras de 1980 (de

aquí su edad de 35 años). Este perfil se muestreó en el cordón de más reciente formación, tomando en cuenta para hacer la calicata, un sitio en donde hubiera más vegetación. En general, tiene una textura arenosa, sin estructura, con colores gris claro. Se compone de los horizontes AC/C<sub>1</sub>/C<sub>2</sub>.

**Tabla 3. Perfil Playa Cocoteros: sus horizontes, profundidades y breve descripción.**


Playa Cocoteros	Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
	AC	0-5	Color gris claro (10yr 6/2), textura arenosa; material muy suelto sin estructura y abundantes raíces.
	C <sub>1</sub>	5-100	Color gris claro (10yr 6/2), textura arenosa; antropizado, encontrando a los 50 cm etiqueta con código de barras y a los 80 cm un hule espuma. Se intercalan franjas negras al parecer magnetita.
	C <sub>2</sub>	100-190	Color gris claro (10yr 6/2), textura arenosa.

#### **IV.1.1.2 Cocoteros**

Este es un perfil compuesto (tabla 4), ya que al no poder muestrear la parte baja, a partir del horizonte C<sub>2</sub>, se revisó en otro corte a 5 m en donde se identifica este horizonte, siguiendo el muestreo del perfil. Se caracteriza por ser arenoso, de estructura muy débil, con colores pardo oscuro a pardo amarillento, conforme aumenta la profundidad. Además, se detecta un sistema de franjas propias de los ambientes formados por sedimentación, que van de colores claros a oscuros, estos

últimos de magnetita posiblemente. En la parte baja se notan moteados de la dinámica redox, aún incipientes. Se compone de los horizontes A<sub>1</sub>/A<sub>2</sub>/C<sub>1</sub>/C<sub>2</sub>/Cg<sub>1</sub>/Cg<sub>2</sub>.

Tabla 4. Perfil Cocoterros: sus horizontes, profundidades y breve descripción.

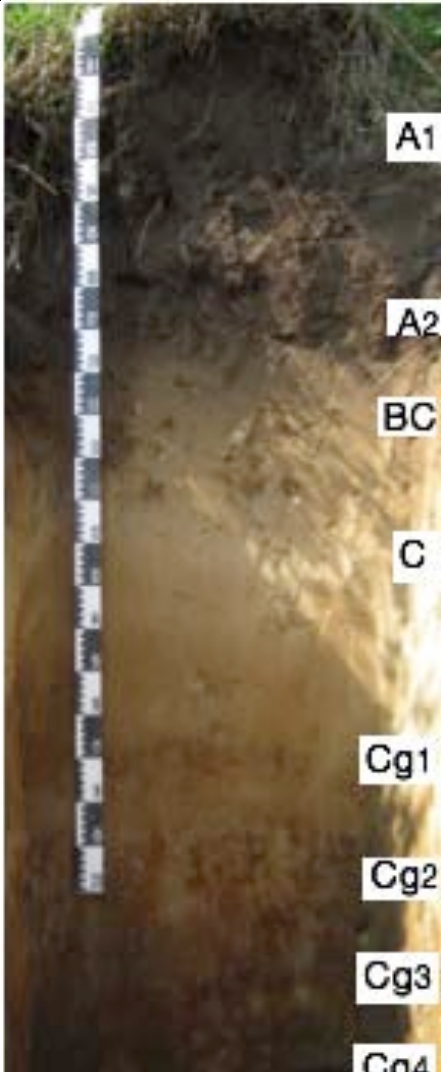
Cocoterros	Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
	A <sub>1</sub>	0-10	Color pardo oscuro-grisáceo (10yr 5/2), textura arenosa; estructura granular débil; alta densidad de raíces finas.
	A <sub>2</sub>	10-32	Color pardo oscuro (10yr 5/3), textura arenosa, estructura granular débil; disminuye cantidad de raíces finas, presencia de raíces gruesas.
	C <sub>1</sub>	32-110	Color pardo amarillento (10yr 6/3), textura arenosa, sin estructura; pocas raíces gruesas.
	C <sub>2</sub>	110-195	Color pardo amarillento-grisáceo (10yr 6/2), textura arenosa, sin estructura. Existen alternancia de franjas de arena parda y oscura.
	Cg <sub>1</sub>	195-212	Color amarillento pardo (10yr 5/4), textura

		arenosa, sin estructura. Aparecen moteados anaranjados.
Cg <sub>2</sub>	212-222	Color pardo grisáceo (10yr 6/2), textura arenosa. Sin fuerte moteado.

### IV.1.1.3 Rancho Magdalena 2

Este perfil se caracteriza por tener un horizonte A relativamente grande, sin embargo, carece de buena estructura (tabla 5). En general tiene una textura arenosa y deficiente estructura, en bloques sub-redondeados. Su color es pardo, con algunos moteados, esto en la parte baja, por procesos redox. Se compone de los horizontes A/AC/BC/C/Cg<sub>1</sub>/Cg<sub>2</sub>/Cg<sub>3</sub>/Cg<sub>4</sub>.

Tabla 5. Perfil Rancho Magdalena 2: sus horizontes, profundidades y breve descripción.

Rancho Magdalena 2	Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
	A	0-70	Color pardo grisáceo oscuro (10yr 3/2), textura arenosa fina, estructura bloques redondeados frágiles. Muchas raíces de diversos tamaños
	AC	70-80	Color gris pardusco (10yr 3/3) más claro que el anterior, textura arena fina, estructura en bloques subredondeados muy frágiles; Menos raíces.
	BC	80-107	Color pardo claro (10yr 6/6), textura arenosa gruesa, poca estructura; menos raíces.


C	107-160	Color pardo claro (10yr 6/6), textura arenosa gruesa, sin estructura.
Cg <sub>1</sub>	160-187	Color pardo claro (2.5y 6/4), textura arenosa, sin estructura; con manchas rojas, amarillas y pardas. Concreciones de Mn.
Cg <sub>2</sub>	187-231	Color pardo muy pálido (2.5y 6/4), textura arenosa, poca estructura; con manchas pardas amarillentas-anaranjadas. Manchas aumentan con la profundidad.
Cg <sub>3</sub>	231-237	Color pardo oscuro (10yr 5/6), textura arenosa, sin estructura; franja de magnetita.
Cg <sub>4</sub>	>237	Color pardo (2.5y 6/4), textura arenosa, sin estructura.



#### IV.1.1.4 Simón Sarlat

Perfil más antiguo de la cronosecuencia, que se encuentra en uno de los cordones de mayor edad (tabla 6). Es un suelo profundo, arenoso, con estructura en bloques sub-angular y sub-redondeados, con rasgos fuertemente gléyicos en la base. Sus colores van de pardo oscuro a pardo amarillento. Tiene en su parte baja, un horizonte reducido de color gris con manchas rojas y negras. Se compone de los horizontes A<sub>1</sub>/A<sub>2</sub>/Bw<sub>1</sub>/Bw<sub>2</sub>/BCg/Cr. Nota: puede ser horizonte G o Cr, este último es la nomenclatura nueva de la WRB 2014.

Tabla 6. Perfil Simón Sarlat, sus horizontes, profundidades y breve descripción.

Simón Sarlat	Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
	A <sub>1</sub>	0-30	Color pardo oscuro (10yr 4/3), textura areno limosa, estructura en bloques sub-angulares medianos no tan friable; abundantes raíces.
	A <sub>2</sub>	30-45	Color pardo oscuro (10yr 4/4), textura areno limosa, estructura en bloques sub-angulares; menor contenido de raíces.
	Bw <sub>1</sub>	45-90	Color pardo amarillento oscuro

		(10yr 5/6), textura arenosa, estructura en bloques sub-redondeados; algunas raíces, bioturbación.
Bw <sub>2</sub>	90-115	Color pardo amarillento (10yr 6/8), textura arenosa, estructura en bloques sub-redondeados; no raíces.
BCg	115-185	Color pardo amarillento (10yr 6/8), textura arenosa, estructura en bloques sub-redondeados; hacia la parte baja (140 cm) aparecen moteados de color rojo sobre una matriz grisácea.
Cr	185-225	Color gris (10yr 5/6), textura arena gruesa, sin estructura; con manchas rojas y negras.

Sobre todo, los cambios de color y el aumento de estructura conforme al tiempo nos permiten tener una primera aproximación del avance de la pedogénesis en la consecuencia.

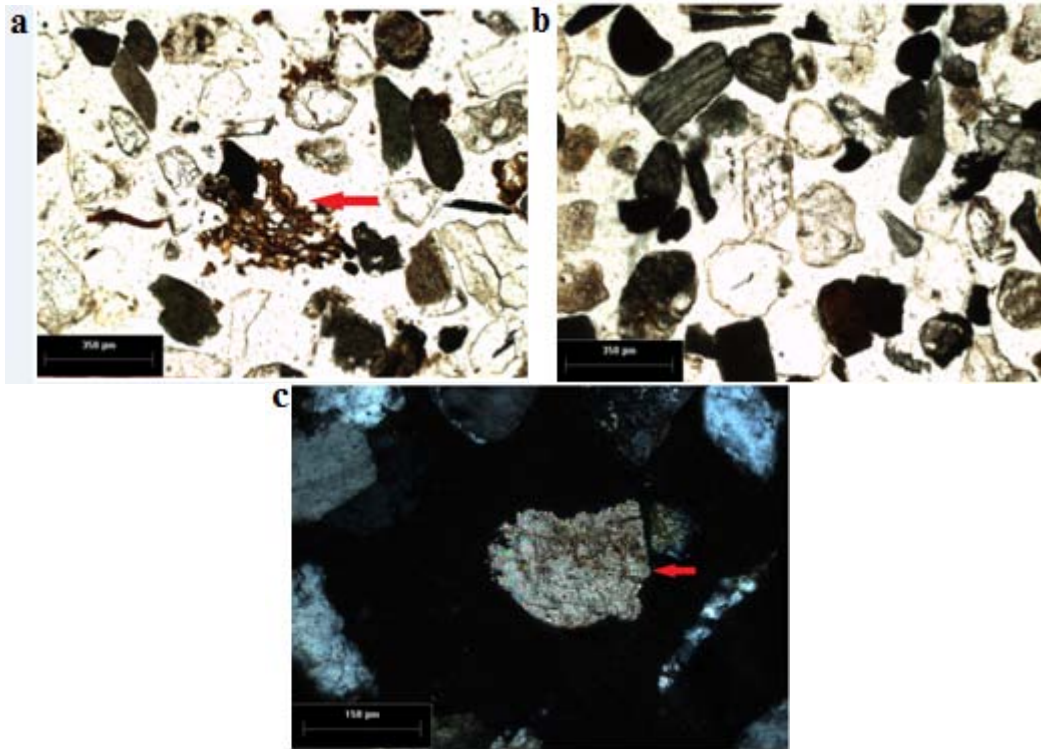
## **IV.2 Micromorfología de láminas delgadas**

Así como se ven cambios en la naturaleza, que son visibles al ojo humano, ahora por medio del microscopio podemos presenciar los cambios a niveles micro. De esta manera el análisis micromorfológico, nos muestra los procesos de formación de suelo que están sucediendo a escala de micras.

Analizando las láminas delgadas de los horizontes que consideramos de importancia para explicar el avance de la pedogénesis vemos:

### **IV.2.1 Playa Cocoteros**

Se tomó muestra del horizonte AC, ya que los demás horizontes son material parental sin ningún proceso pedogenético *in situ*, aparentemente. En la lámina delgada se encontró (a 350  $\mu\text{m}$ ) materia orgánica fresca, sin mucha alteración pues aún se distinguen algunas estructuras propias de los tejidos vegetales (fig. 13-a). Los minerales encontrados como: magnetita, feldespato potásico, cuarzo, piroxeno, plagioclasa, anfíbol, entre otros; se encuentran sin señales de alteración por pedogénesis, sin embargo están redondeados y con evidencias de zonas de impacto, esto por el retrabajamiento del oleaje. Los poros entre partículas se ven libres (fig. 13 -b). Características que de acuerdo a Stoops (2001), las engloba en un término: *monic*. Sin embargo, se identifican algunos minerales de calcita con señales de intemperismo, pero por la edad del cordón y la dinámica del oleaje y la sedimentación, nos lleva a pensar que estos minerales se intemperizaron *ex situ* (fig. 13 -c).

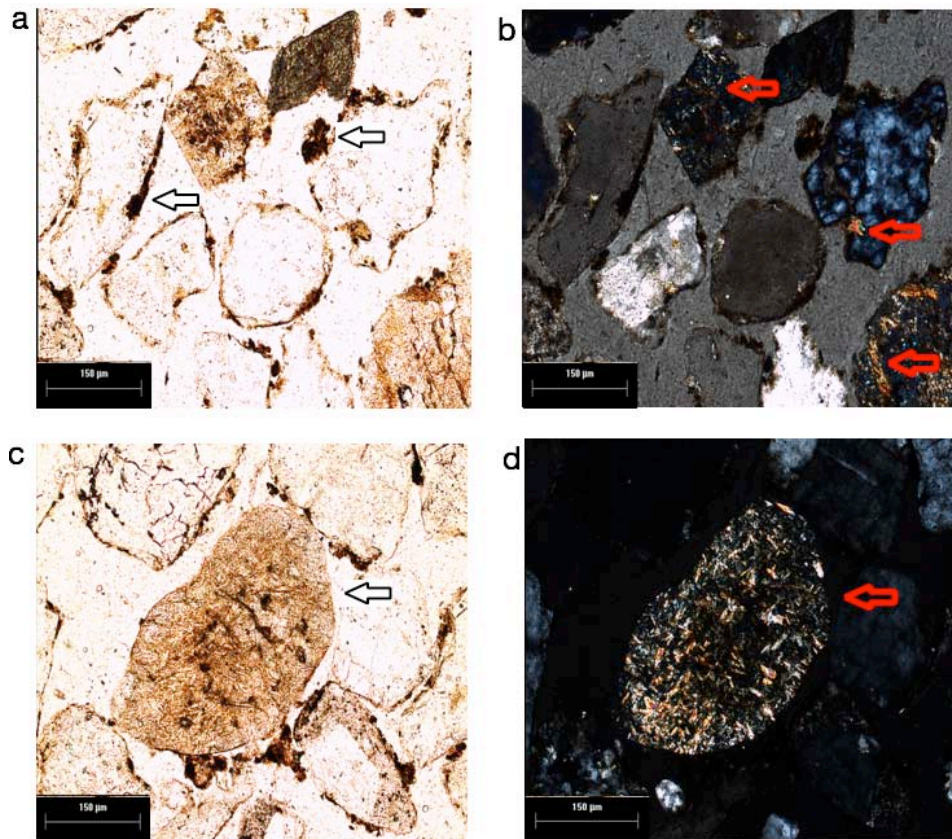


**Figura 13. Horizonte A de Playa cocoteros. Las flechas señalan: a) materia orgánica fresca; b) minerales primarios sin recubrimientos y limpios, con poros libres; c) mineral de calcita, con algunas señales de intemperismo ex situ.**

#### **IV.2.2 Cocoteros**

El horizonte que se analizó fue A<sub>2</sub>, que se observa en la figura 14-a: los minerales casi limpios, con un poco de materia orgánica en películas discontinuas sobre los minerales y en forma de agregado globular. Sin embargo, su discontinuidad y espesor, nos hablan de un horizonte poco desarrollado. Si esta misma imagen se analiza con nicoles parcialmente cruzados (fig. 14-b), presenta una serie de pequeños puntos de color amarillento brillante, éstos son pequeñas acumulaciones de arcilla, pero es de hacerse notar que dicha arcilla no está recubriendo los minerales sino que se encuentra entre pequeñas fracturas de los minerales (fig. 14-c). En la figura 14-d se aprecia el mismo mineral de la figura 14-c (nicoles cruzados), con arcilla alojada en pequeñas fracturas. Esto nos da a entender, como los minerales primarios, que

conforman el material parental, contiene arcilla que fue producto de un intemperismo ex situ, que posteriormente heredan al suelo.



**Figura 14. Horizonte A<sub>2</sub> de Cocoterros. Las flechas señalan: a) materia orgánica en pequeños agregados globulares y en películas discontinuas; b) minerales, visto con nicoles cruzados, en donde se aprecia pequeñas acumulaciones de arcilla dentro de los minerales; c) mineral fracturado; d) mineral conteniendo arcilla entre sus fracturas, que posteriormente hereda al suelo.**

Para Cocoterros, se tomó otro horizonte para su análisis, el Cg<sub>1</sub> que forma parte de los afectados por procesos redox. La figura 15 nos muestra, como este horizonte se encuentra prácticamente limpio, pues no hay acumulaciones, ni recubrimientos de algún material, únicamente se ven minerales frescos como anfíbol, magnetita y cuarzo.

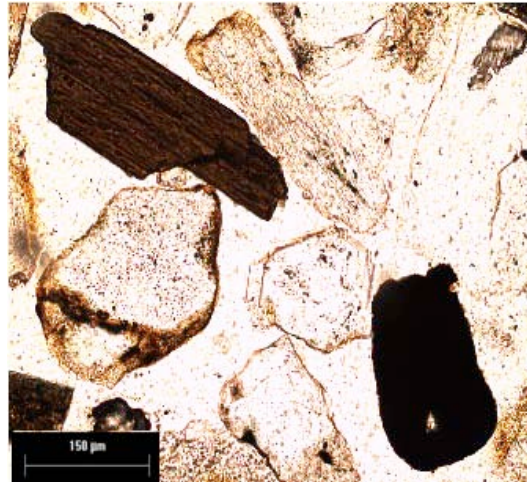


Figura15. Horizonte Cg<sub>1</sub> de CT. En donde se ven minerales como anfíbol (esquina superior izquierda), magnetita (esquina inferior derecha) y cuarzo, los cuales se encuentra frescos y sin recubrimientos de algún material.

#### IV.2.3 Rancho Magdaleno 2

Para el perfil RM2 se analizó el horizonte Cg<sub>2</sub> afectado por procesos redox, el cual se muestra la figura 16. Se observan minerales recubiertos por óxidos de Fe, que además, se encuentran uniendo algunos minerales por medio de acumulaciones en forma de puente. En este horizonte se ve un desarrollo de pedogénesis.

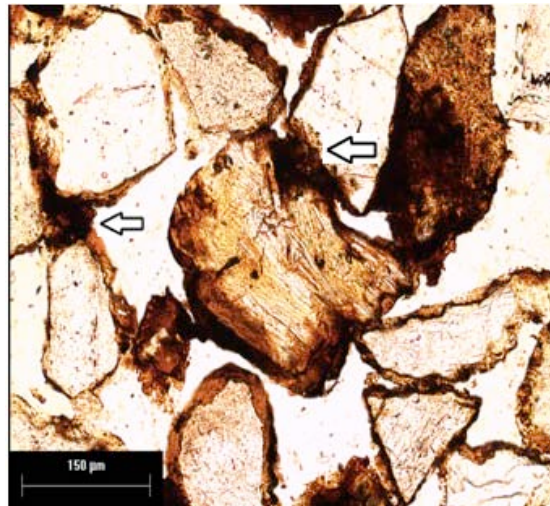


Figura 16. Horizonte Cg<sub>1</sub> de CT. En donde se muestran óxidos de Fe recubriendo minerales, con una delgada película y formando puentes.

#### IV.2.4 Simón Sarlat

En el horizonte  $A_1$  (fig. 17-d), se observa materia orgánica humificada recubriendo minerales (chitonic; por Stoops, 2001) en forma de pequeños agregados, dentro de los poros, sin embargo la mayor parte de los poros está libre (enaulic; Stoops, 2001). En el horizonte  $Bw_1$  se perciben en los minerales recubrimientos finos de óxidos de Fe, que además forman puentes entre minerales (fig. 17-e). Gracias al efecto de birrefringencia, dado en el microscopio por nicoles cruzados, se distinguen en la figura 17-f, inclusiones de minerales arcillosos en pequeñas cantidades, de color amarillento (chitonic; por Stoops, 2001).

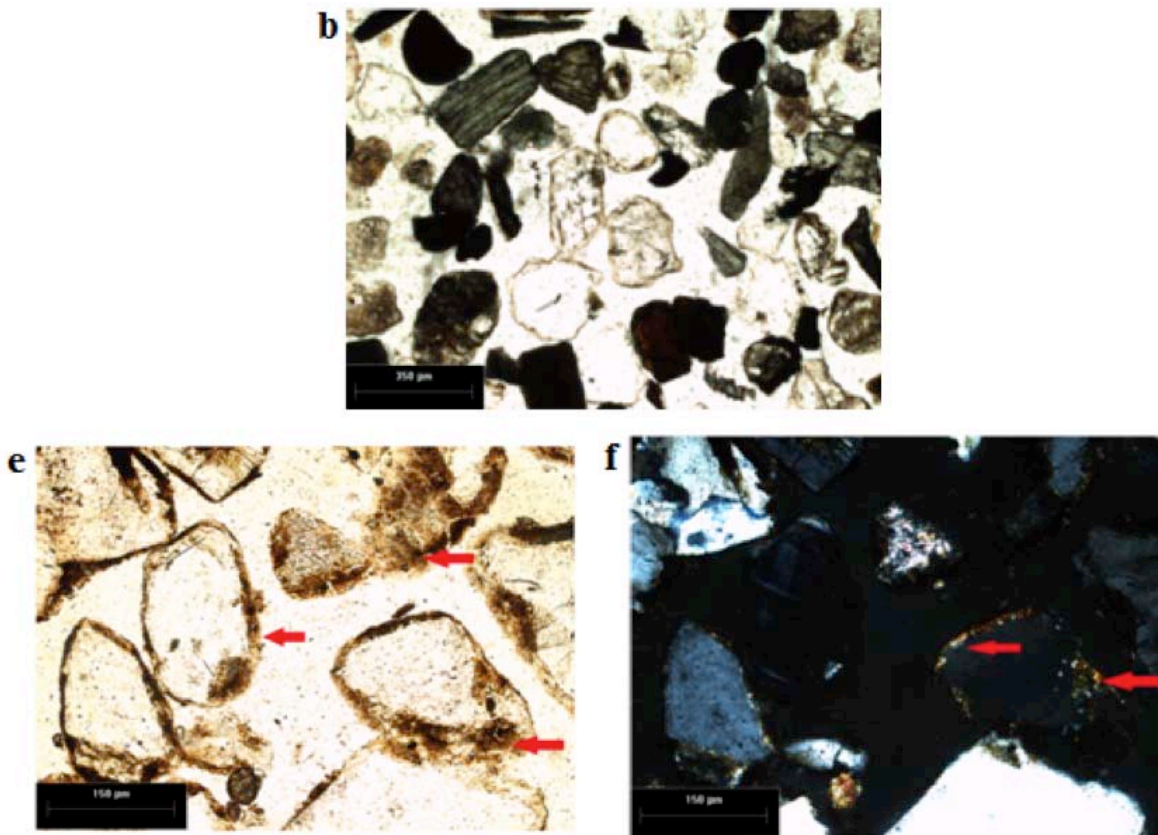


Figura 17. Horizonte  $A_1$  de Simón Sarlat. Las flechas señalan: b) materia orgánica humificada, recubriendo minerales y en forma de agregados; e) minerales con recubrimientos de óxidos de Fe y formando puentes; f) pequeñas inclusiones de arcilla, color amarillento.

De la misma manera el análisis micromorfológico, nos muestra el desarrollo de algunos procesos, como es: acumulación de materia orgánica, de óxidos de Fe y arcilla, que son señal de avance de pedogénesis a través de la cronosecuencia.

### IV.3 Análisis de laboratorio

#### IV.3.1 Densidad aparente

Se determinó la densidad aparente (DA), como apoyo a los demás análisis, ya que por medio de ésta, se calcularon los kilogramos de material pedogenético para cada horizonte de la cronosecuencia. De acuerdo a los resultados de la tabla 7, vemos que la densidad aparente se encuentra entre 1.65 gr/cm<sup>3</sup> en PC-C<sub>2</sub> y 1.36 gr/cm<sup>3</sup> en SS-A<sub>1</sub>. Por otro lado, la tendencia de la DA, es a disminuir levemente, conforme al tiempo, es decir, entre más antiguo sea el perfil, su densidad aparente disminuye.

Tabla 7. Valores de densidad aparente, en los horizontes de la cronosecuencia.

Perfil	horizonte	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Playa Cocoteros (PC)</b>	AC	1.59
	C <sub>1</sub>	1.56
	C <sub>2</sub>	1.65
<b>Cocoteros (CT)</b>	A <sub>1</sub>	1.44
	A <sub>2</sub>	1.53
	C <sub>1</sub>	1.54
	C <sub>2</sub>	1.60
	Cg <sub>1</sub>	1.56
	Cg <sub>2</sub>	1.54
<b>Rancho Magdalena 2 (RM2)</b>	A	1.46
	AC	1.44
	BC	1.47
	C	1.50
	Cg <sub>1</sub>	1.46
	Cg <sub>2</sub>	1.47
	Cg <sub>3</sub>	1.55
	Cg <sub>4</sub>	1.44



<b>Simón Sarlat (SS)</b>	A <sub>1</sub>	1.36
	A <sub>2</sub>	1.49
	Bw <sub>1</sub>	1.50
	Bw <sub>2</sub>	1.58
	BCg	1.53
	Cr	1.53

### IV.3.2 Textura en %

De acuerdo a los análisis de textura, vemos que la fracción arena es la dominante pues cuenta con un promedio de 95% en toda la cronosecuencia. No obstante, si observamos las gráficas (fig. 18), nos percatamos que la fracción arcilla responde a un aumento conforme pasa el tiempo, así vemos en Playa Cocoteros (PC) un 1% en el perfil afectado por pedogénesis y en el perfil de base hasta un 4.4%, sin embargo, la edad de este cordón nos hace pensar en que puede ser arcilla heredada. Para Cocoteros (CT), tenemos un máximo de arcilla en el horizonte A<sub>2</sub> de 5.6%, pero también, en los gléyicos, casi de la misma proporción, y un mínimo en los C. En Rancho Magdalena 2 (RM<sub>2</sub>), se tiene el máximo de arcilla en Cg<sub>1</sub> con 8.7% y en A un 5.6%, así de la misma manera se ve un mayor porcentaje de arcilla en la parte gléyica que en el solum, y se tiene el horizonte con menor arcilla de toda la cronosecuencia, al BC con 0.4%. Finalmente, para Simón Sarlat (SS), tenemos el horizonte de mayor contenido de arcilla de la cronosecuencia, a Bw<sub>2</sub>, además que en promedio tiene los valores más altos de todos los perfiles de la cronosecuencia.

Así, comparando en las gráficas el aumento de la fracción arcilla, conforme al tiempo, se refleja en avance en la formación de suelo.

### IV.3.3 Arcilla en kg m<sup>-2</sup>

Por medio de la densidad aparente, se calculó el peso en kilogramos por horizonte (fig. 18), de arcilla. Este cálculo está influenciado fuertemente por el espesor del

horizonte, por eso podemos ver que en  $RM_2$  en el horizonte A cuenta con  $57.7 \text{ kg m}^{-2}$ ; en SS, BCg con  $95.05 \text{ Kg m}^{-2}$ ; y PC en  $C_2$  con  $65.69 \text{ kg m}^{-2}$ , así tenemos un incremento en los kg de arcilla. Sin embargo, podemos ver el avance de la pedogénesis en el tiempo, pues si ponemos atención en los horizontes B, vemos como a partir de  $RM_2$  se empiezan a formar, y en SS ya tiene en B cámbico con un valor de  $44.12 \text{ kg m}^{-2}$ , seguramente, en su mayoría, producto de la pedogénesis.

En PC la arcilla se concentra hacia la parte baja del perfil; en CT tiende a acumularse en los horizontes centrales; en  $RM_2$  se acumula en el límite entre el horizonte C y los horizontes gléyicos, a excepción de A, que parecería un perfil independiente de suelo pigmentado por materia orgánica; y SS que concentra la arcilla en los horizontes Bw, sin embargo pareciera que por procesos redox en el horizonte BCg se produjera arcilla.

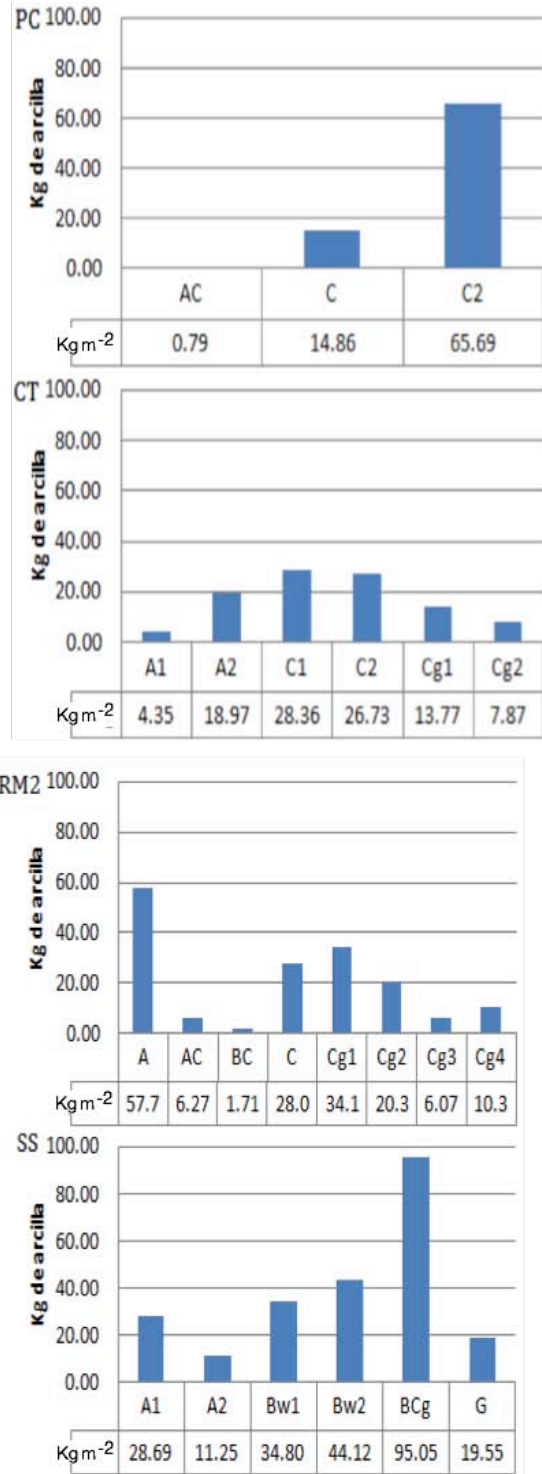
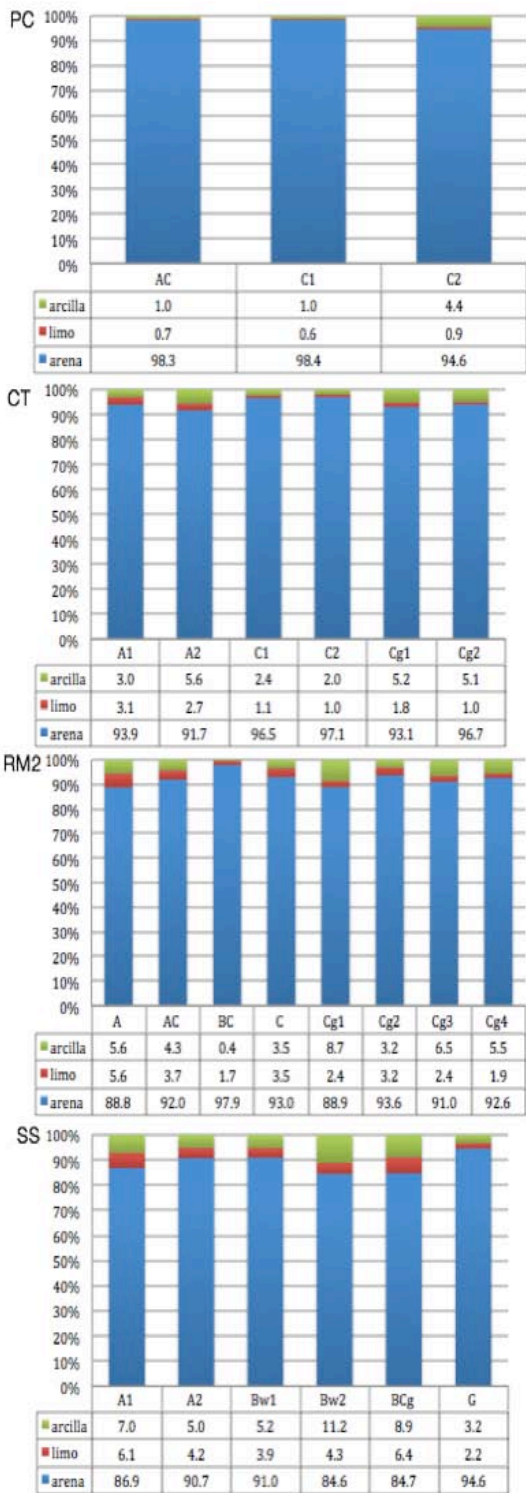


Figura 18. Porcentaje y concentración en Kg m<sup>-2</sup>, de arcilla en los perfiles de la cronosecuencia.

#### IV.3.4 Difracción de rayos X: tipo de arcilla y minerales

Se comenzó por determinar en las muestras totales, los principales minerales y comparar la variación en cada perfil de la cronosecuencia. Los resultados muestran a los difractogramas siguiendo un mismo patrón, con un mínimo de variaciones, pues prácticamente se superponen uno sobre otro, sin embargo, las variaciones se dan en las proporciones relativas en las que se encuentran las diferentes fases. Los principales minerales son: cuarzo, feldespatos, plagioclasas, anfíboles, incluso se alcanza a distinguir levemente la fracción arcilla, entre otros (fig. 19).

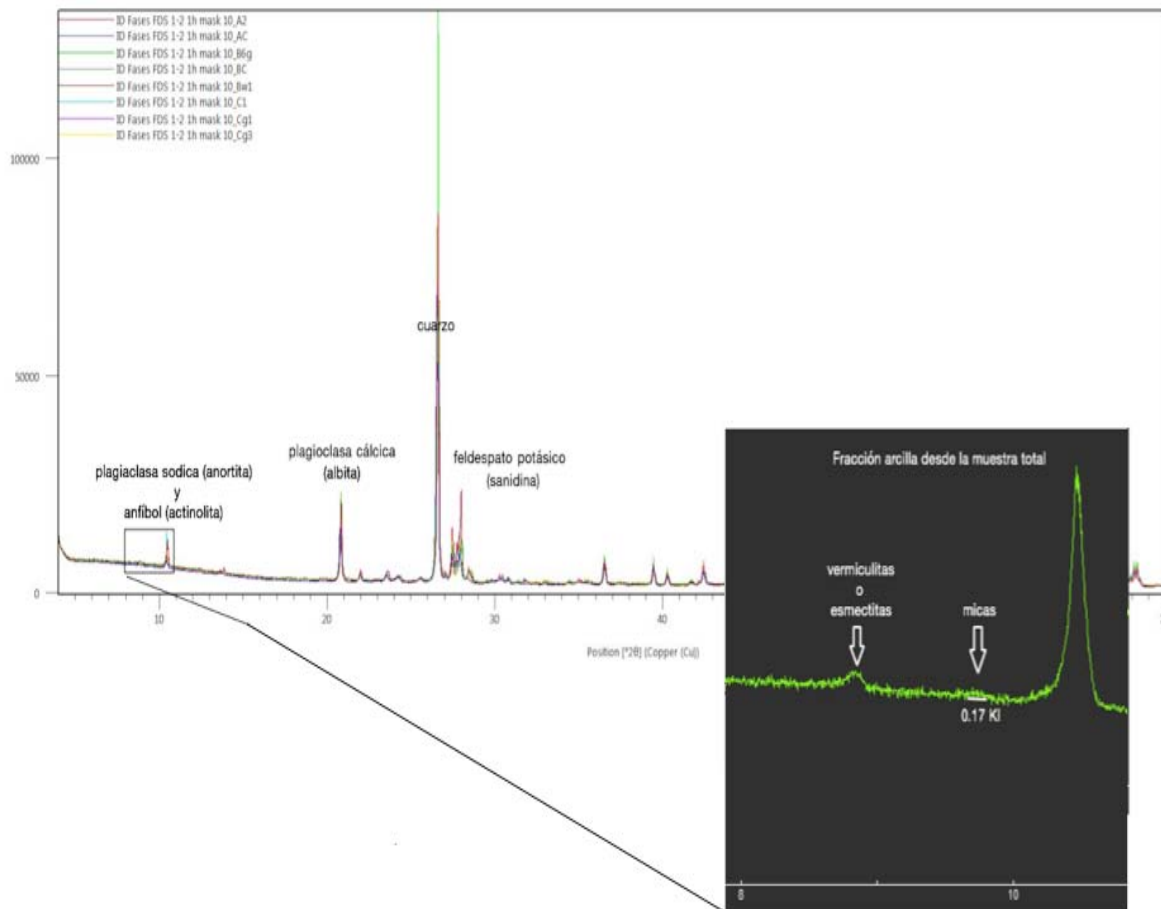
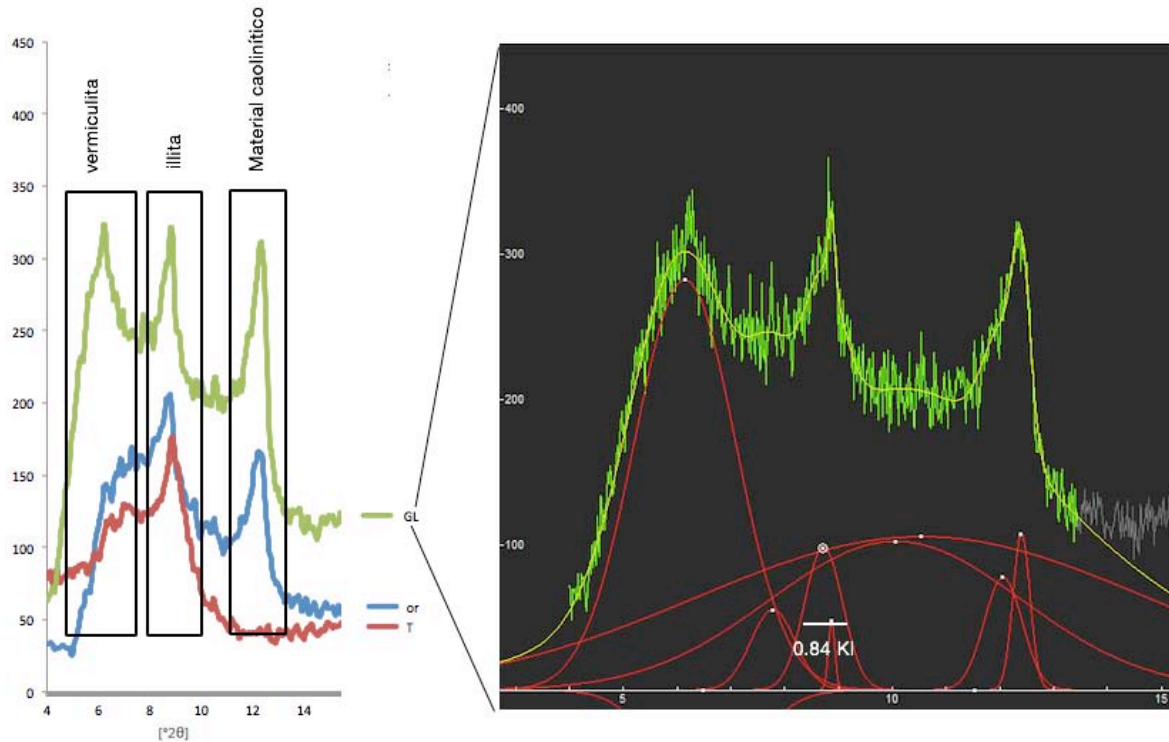


Figura 19. Difractogramas de las muestras totales superpuestos, mostrando principales minerales y escasa fracción arcilla.

Una vez conociendo los principales minerales, ponemos nuestra atención en la fracción arcilla, ya que es importante conocer qué tipo de arcilla se encuentra en cada perfil y horizonte, pues cada una da características específicas al suelo. No obstante, es un tanto difícil detectar los tipos de arcillas en los difractogramas de muestra total, ya que por un lado la cantidad de arcilla es demasiado pequeña (evidencia de un suelo joven), y por otro se tienen algunas arcillas con bajo índice de cristalinidad como las micas (fig. 19). Éste es de aproximadamente 0.17 KI (índice de Kübler), lo que a su vez nos habla de la temperatura a la que fueron formadas de aproximadamente 300 °C por metamorfismo, por lo que este grupo de micas han sido heredadas al suelo y no formadas in situ (Abad, 2006).

Pero, al separar la fracción arcilla de la muestra total tenemos una mejor resolución en los difractogramas, distinguiendo vermiculitas, esmectitas, material caolinítico y micas hidratadas (illitas). En lo que respecta a este último grupo de arcillas, se ha hecho difícil el distinguir un material puro, no obstante el horizonte en donde la fracción arcilla se diferencia muy bien es en el horizonte A<sub>2</sub> del perfil Cocotero, en donde los picos de la vermiculita, illita y de material caolinítico se distinguen perfectamente (fig. 20).



**Figura 20.** Difractograma de la fracción arcilla en el horizonte A<sub>2</sub> del perfil Cocoteros. En donde se muestra el difractograma con sus tres mediciones: or (muestra orientada), GL (muestra tratada con etilenglicol) y T (muestra sometida a 550 °C) dando como resultado picos para vermiculitas, illitas y material caolinítico. La muestra glicolada es la que mejor muestra los picos por lo que ahí se midió el índice de Kübler para la illita que es de 0.84.

Este es el único horizonte en donde hay una buena diferenciación, sin embargo se encuentra en uno de los perfiles mas jóvenes, pero con al parecer el tiempo suficiente para hidratar las micas y obtener un poco de illita, pues vemos que tiene un índice de cristalinidad de 0.84 KI (fig. 20), lo que nos indica una formación más superficial (Abad, 2006). Aun así, la idea de que en su mayoría las arcillas han sido heredadas, es muy fuerte.

De acuerdo a la tabla 8, en PC se tiene una combinación de esmectita, illita y material caolinítico, sin ser ninguna dominante. Para CC en el horizonte A<sub>2</sub> se tiene una dominancia de vermiculita sobre illita y material caolinítico, para el horizonte Cg<sub>1</sub> domina la esmectita e interestratificados de esmectita/illita. En RM2 para AC/BC/Cg<sub>3</sub>,

la dominancia es de vermiculita; y SS cuenta con dominancia de vermiculita en el horizonte Bw<sub>1</sub> y en el BCg la arcilla dominante es esmectita.

En la parte del solum domina la vermiculita y en la parte redox, las esmectitas.

**Tabla 8. Concentración relativa y arcillas minerales identificadas en los perfiles de la cronosecuencia.**

Perfil	Horizonte	Concentración	Fases identificadas en orden decreciente
<b>Playa Cocoterros (PC)</b>	C <sub>1</sub>	+	Esmectita
		+	Illita
		+	Material Caolinítico
<b>Cocoterros (CT)</b>	A <sub>2</sub>	+++	<b>Vermiculita</b>
		++	Illita
		+	Material Caolinítico
	Cg <sub>1</sub>	+++	<b>Esmectita e interestratificados de esmectita/ilita</b>
		++	Illita
		+	Material Caolinítico
<b>Rancho Magdaleno 2 (RM2)</b>	AC	+++	<b>Vermiculita</b>
		++	Illita
		+	Material Caolinítico
	BC	+++	<b>Vermiculita</b>
		++	Illita no pura
		+	Material Caolinítico
	Cg <sub>3</sub>	+++	<b>Vermiculita</b>
		++	Illita
		+	Material Caolinítico
<b>Simón Sarlat (SS)</b>	Bw <sub>1</sub>	+++	<b>Vermiculita</b>
		++	Illita no pura
		+	Material Caolinítico

BCg	+++ <b>Esmectita</b>
	++ Illita
	+ Material Caolinítico

#### IV.3.5 pH y conductividad eléctrica

El pH se mantiene entre 6.5 y 7, esto es neutro con ligera tendencia a la acidez, en toda la cronosecuencia, a excepción de CT en donde va de 6.81 a 8.32, esto es neutro con tendencia a básico. Además, en general, los horizontes A tienen tendencia a acidez (fig. 21). En PC se mantiene entre 6.7 en AC y 7.1 en C<sub>1</sub>; en CT solo el horizonte A<sub>1</sub> tiende a acidez, los demás están entre 7.52 a 8.32, este es el perfil, de toda la cronosecuencia, que tiende a la alcalinidad; para RM2 el pH es muy estable pues se mantiene entre 6.61 (BC) y 6.97 (Cg<sub>2</sub>); de la misma manera, SS se mantiene con valores cercanos a 7, a excepción de su horizonte A<sub>1</sub>. Otra de las tendencias que se notan es que el pH tiende a ser de mayor valor en los horizontes gléyicos.

Por su parte la conductividad eléctrica (CE), es muy baja pues se encuentra en el orden de los microSiemens por centímetro, sin embargo, manejaremos términos como relativamente alto y relativamente bajo (fig. 21). En PC, se mantiene relativamente alta con respecto a los demás perfiles, con valores de entre 50.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en C<sub>2</sub> y 86.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en AC; para CT se tiene el valor más alto en A<sub>1</sub> con 41.1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dejando a los demás horizontes entre 12.95  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (C<sub>2</sub>) y 25.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (A<sub>2</sub>); RM2 mantiene sus valores entre 11.18  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en Cg<sub>2</sub> y 25.48  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para BC; y SS con valores de 16.16  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Bw<sub>2</sub>) y 38.4  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Bw<sub>1</sub>), esto sin tomar en cuenta el horizonte A<sub>1</sub>, que dispara la CE a el mayor valor de toda la cronosecuencia con 109.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sin embargo esto puede ser por algún tipo de contaminación, seguramente antrópica.

La CE, al contrario del pH, tiende a ser más baja en los horizontes gléyicos y con tendencia alta en el solum. Por otro lado, los horizontes que presentan una fuerte alza son los A, a excepción de RM<sub>2</sub>.



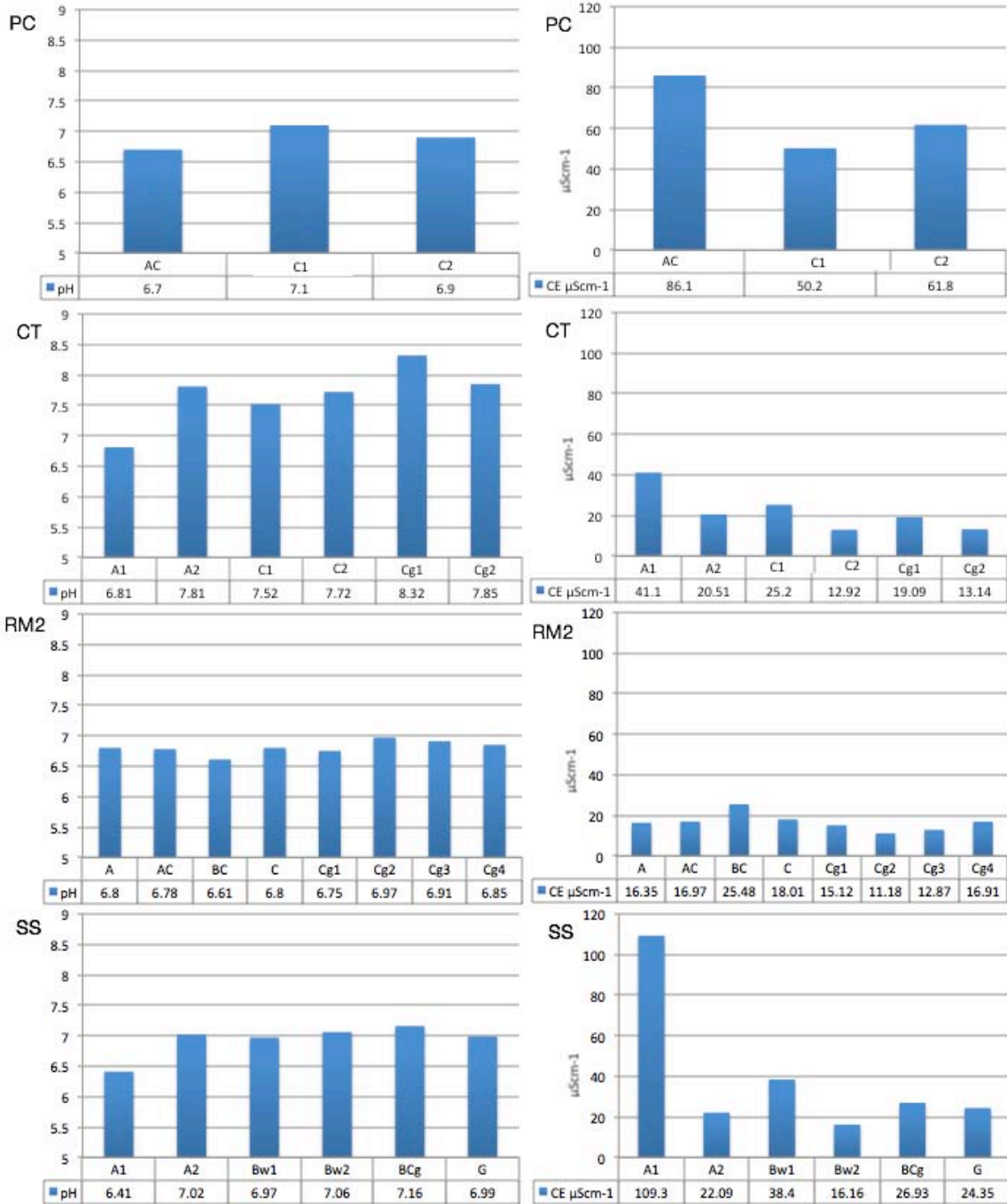


Figura 21. Valores de pH y conductividad eléctrica (en micro Siemens por centímetro:  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), en la cronosecuencia.

#### IV.3.6 Materia orgánica: en %

La materia orgánica (MO) no se analizó para todos los horizontes sino solo en aquellos que tienen características húmicas y acumulación de MO. Estos horizontes son los A y los que tienen alguna característica similar. En PC, solo se muestreó el horizonte AC que tiene 0.81%; para CT se tiene A<sub>1</sub> con 2.04% y A<sub>2</sub> con 1%; RM<sub>2</sub> cuenta con A (2.67%) y AC (2.11); y en SS, cuyos horizontes son A<sub>1</sub> con 4.47% y A<sub>2</sub> con 2.69 (fig. 22). De acuerdo a estos valores, es clara la tendencia ascendente del porcentaje de MO en la cronosecuencia. Vemos que PC tiene el mínimo valor y SS el máximo.

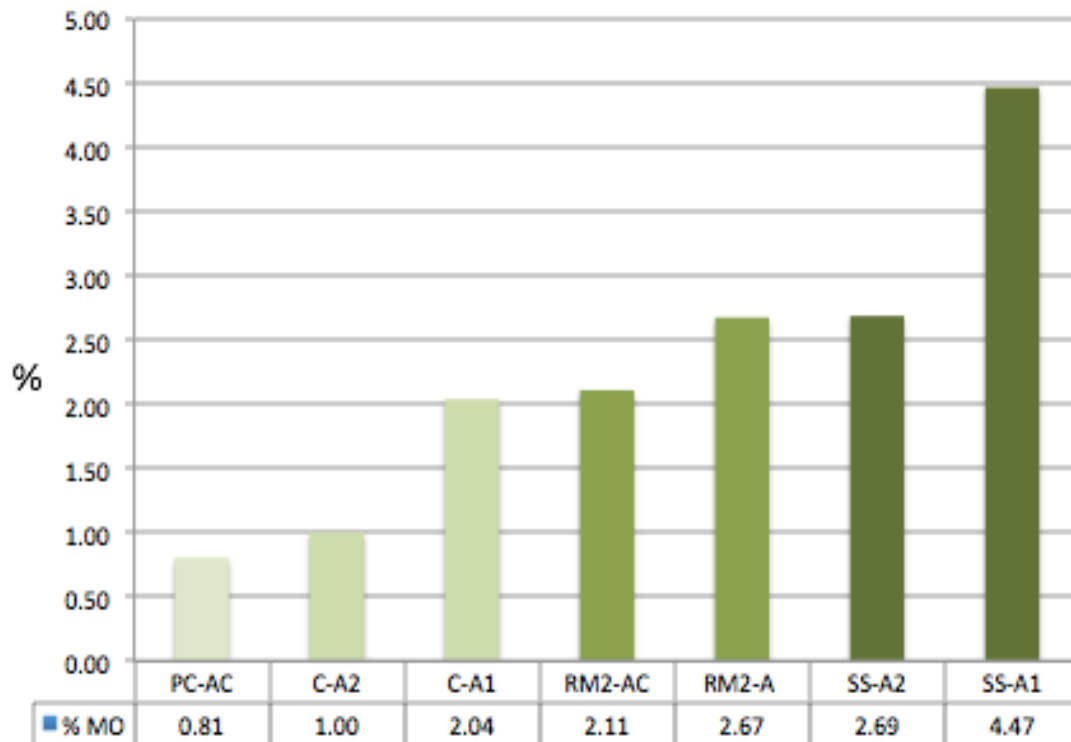


Figura 22. Valores de porcentaje de materia orgánica en los horizontes con características húmicas y acumulación de MO en la cronosecuencia.

#### IV.3.7 Materia Orgánica: en Kg m<sup>-2</sup>

De acuerdo a los resultados en Kg/horizonte y metro cuadrado en superficie (considerando la densidad aparente y el espesor del horizonte), la acumulación de

materia orgánica en los horizontes de la cronosecuencia, con propiedades húmicas y de acumulación (A), es mínima en PC con  $0.67 \text{ Kg m}^{-2}$  en un espesor de horizonte A de 5 cm; en CT se tiene  $3.54 \text{ Kg m}^{-2}$  para ambos horizontes, A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub> con espesores de 10 y 12 cm; para RM<sub>2</sub> en AC se tiene  $3.10 \text{ Kg m}^{-2}$ , sin embargo en A, se dispara la acumulación a  $28.13 \text{ Kg m}^{-2}$ , esto es por que A es un horizonte relativamente grande, pues cuenta con 70 cm de espesor, (cabe la posibilidad de que A sea todo un perfil de suelo que se encuentra pigmentado por materia orgánica); y SS que se ajusta más a la dinámica de la cronosecuencia, y cuenta con valores de  $18.18 \text{ Kg m}^{-2}$  en A<sub>1</sub> con un espesor de 30 cm y  $6.69 \text{ Kg m}^{-2}$  para A<sub>2</sub> con espesor de 15 cm (fig. 23). Sin embargo, si tomamos un espesor constante de 20 cm por perfil, tenemos una clara tendencia a acumularse materia orgánica dentro de la cronosecuencia, a saber: PC con  $2.68 \text{ Kg m}^{-2}$ , CT con  $5.31 \text{ Kg m}^{-2}$ , RM<sub>2</sub> con  $8.03 \text{ Kg m}^{-2}$  y SS con  $12.12 \text{ Kg m}^{-2}$ .

Así, la tendencia de la MO es a acumularse con el tiempo, dentro de la cronosecuencia.

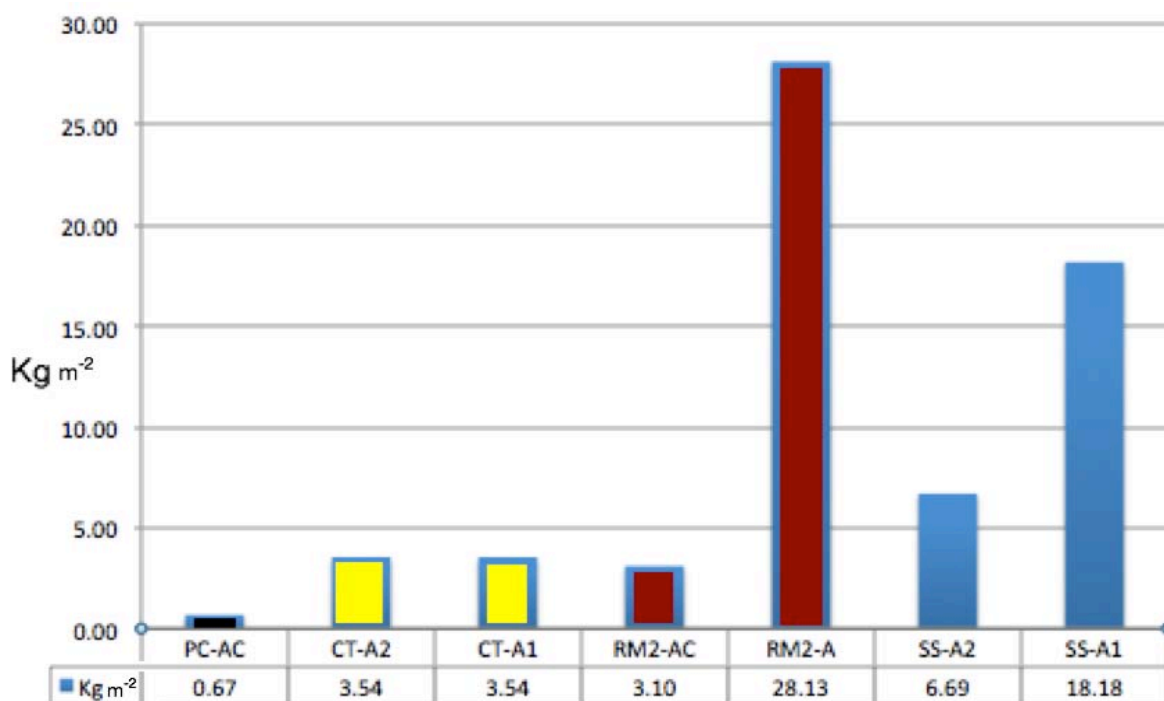


Figura 23. Valores en  $\text{Kg m}^{-2}$ /horizonte de materia orgánica, en los horizontes con características húmicas y acumulación de MO en la cronosecuencia.

### IV.3.8 Gráficas Resumen

Para comprender mejor la relación que hay entre textura, pH, conductividad eléctrica y la materia orgánica, he establecido una serie de gráficas por perfil.

#### IV.3.8.1 Playa cocoteros

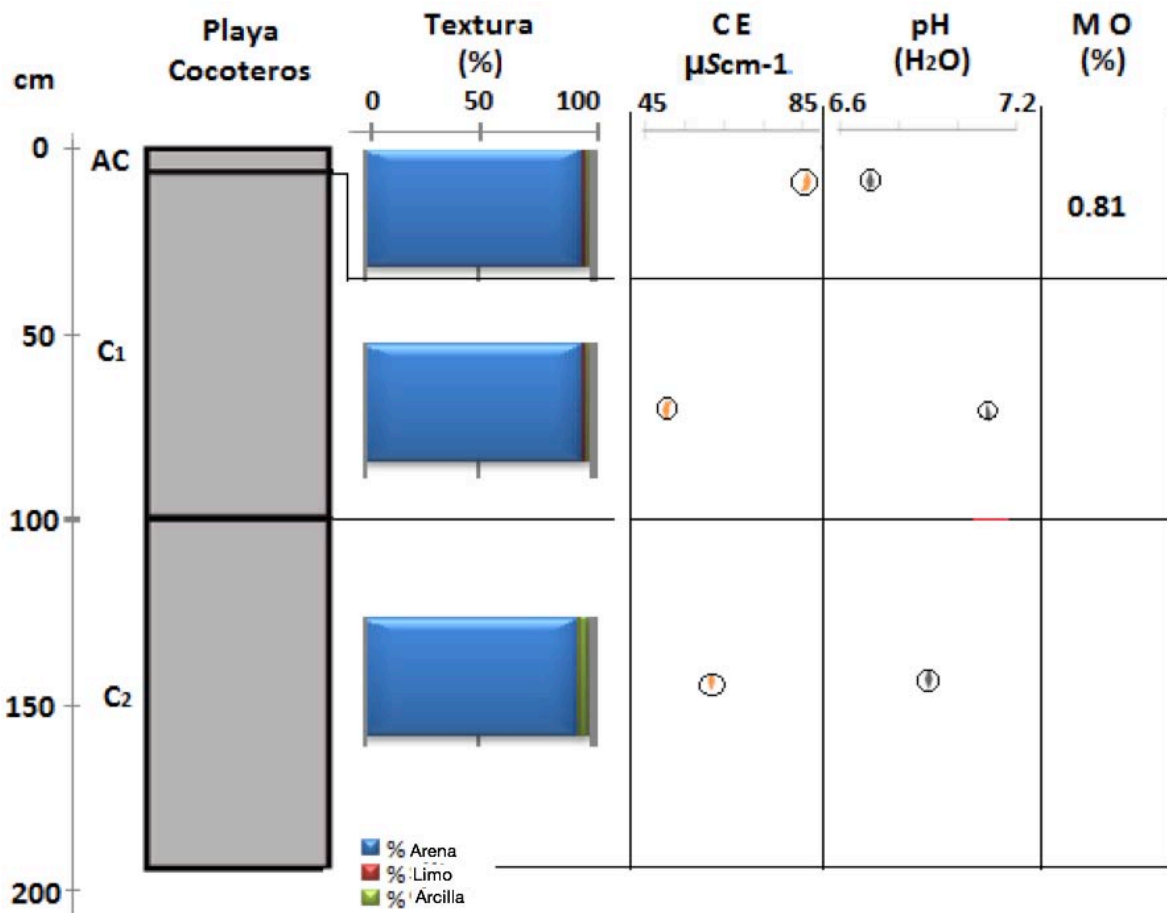


Figura 24. Gráfica resumen de Playa Cocoteros, con: profundidad, horizonte, color, textura, conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.

IV.3.8.2 Cocoteros

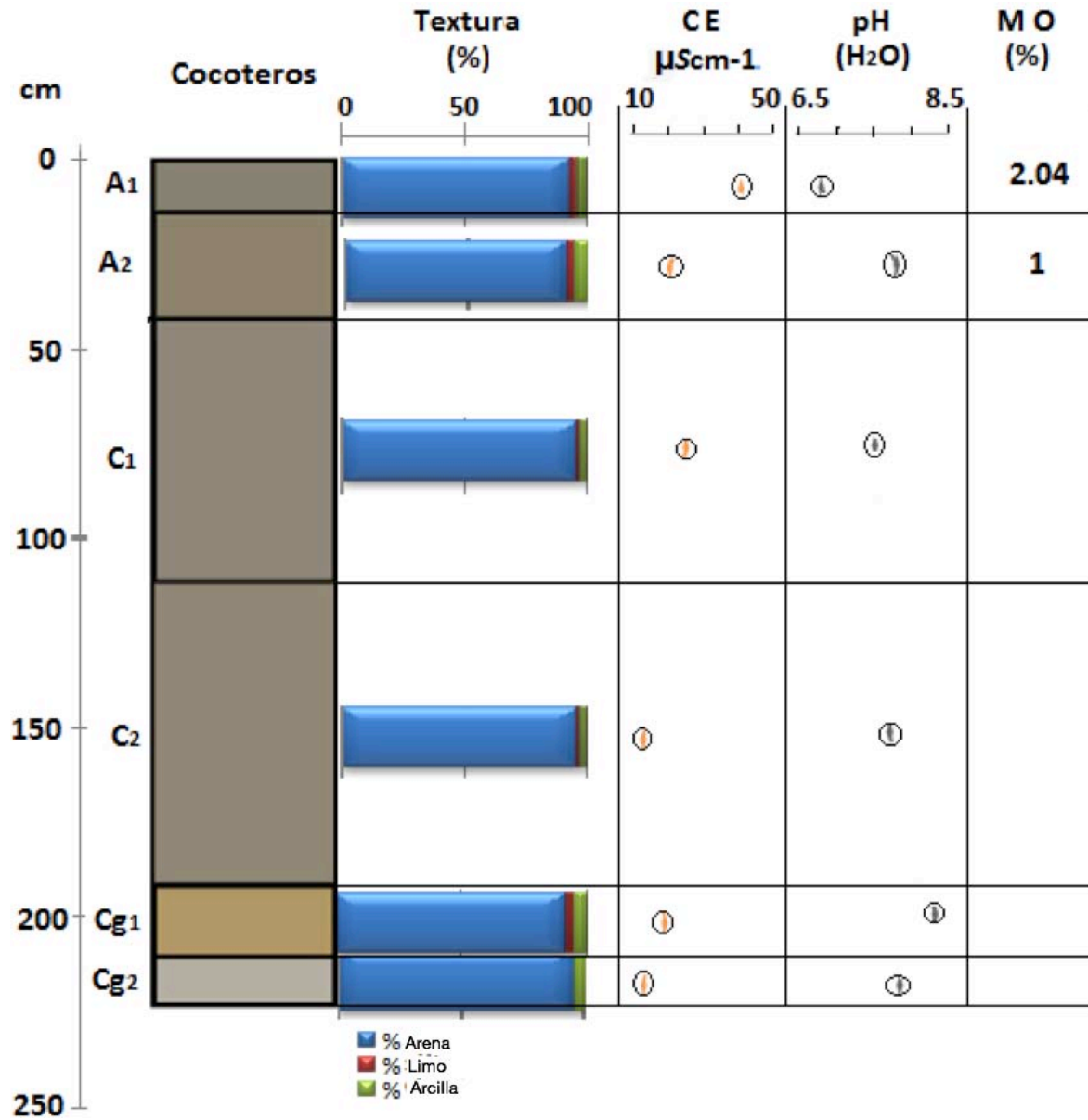


Figura 25. Gráfica resumen de Cocoteros, con: profundidad, horizonte, color, textura, conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.

IV.3.8.3 Rancho Magdalena 2

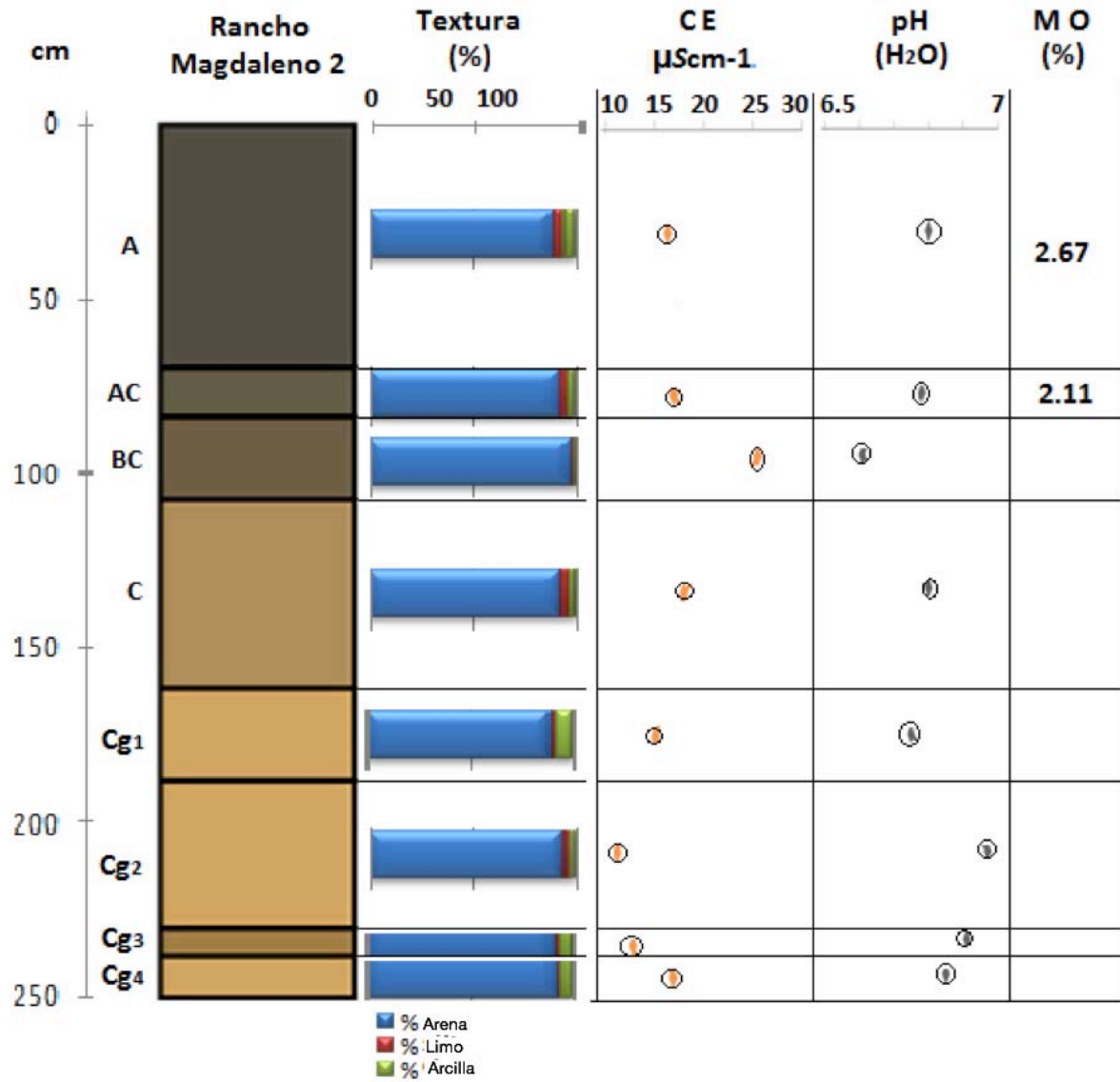


Figura 26. Gráfica resumen de Rancho Magdalena 2, con: profundidad, horizonte, color, textura, conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.

IV.3.8.4 Simón Sarlat

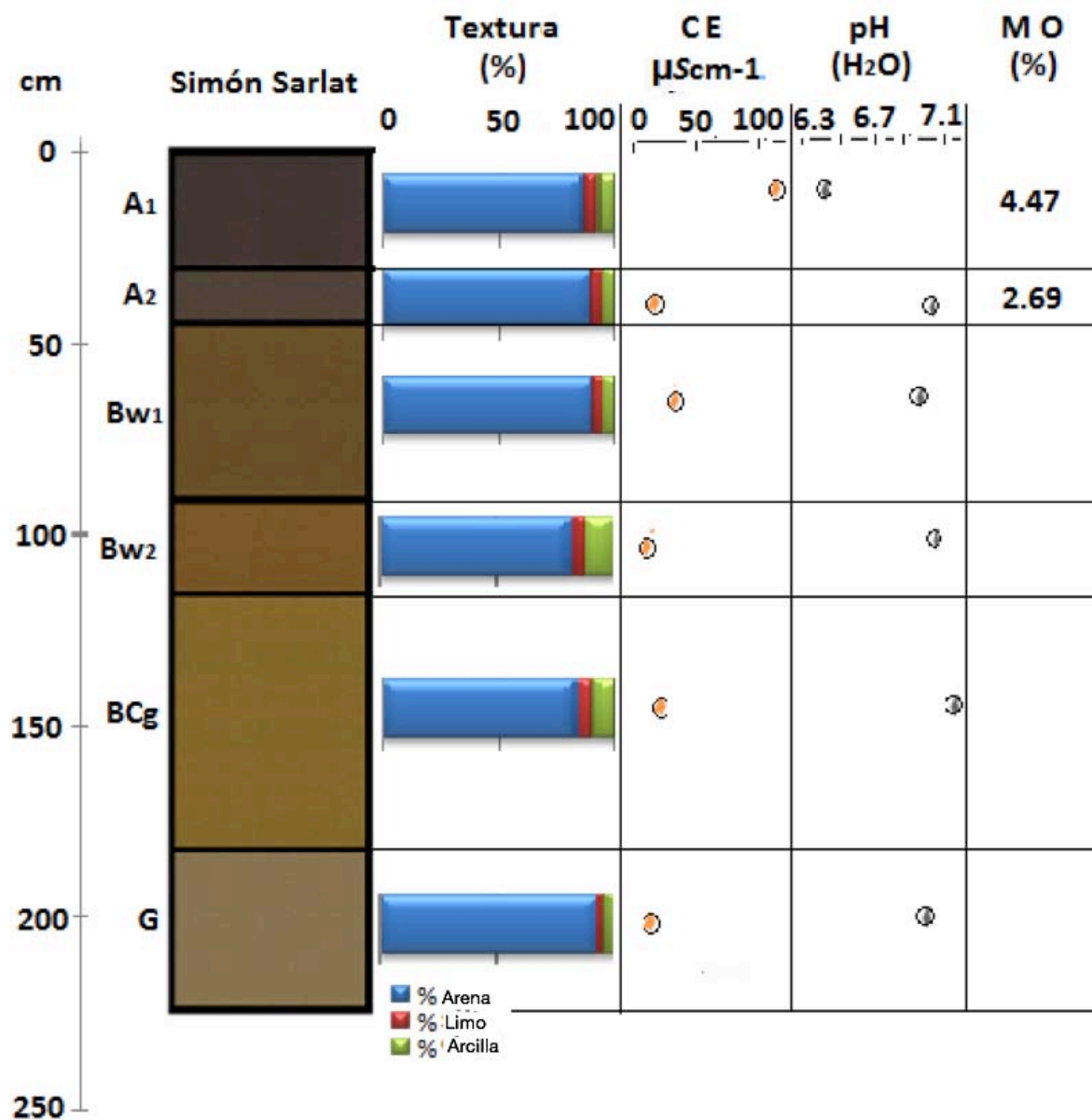


Figura 27. Gráfica resumen de Simón Sarlat, con: profundidad, horizonte, color, textura, conductividad eléctrica, pH y materia orgánica.

#### IV.3.9 Fluorescencia de rayos X: K, Fe, Ti y Zr totales

Por medio de este análisis se determinaron los valores totales en mg/Kg de potasio (K), hierro (Fe), titanio (Ti) y circonio (Zr), y gracias a la densidad aparente, se calcularon los kilogramos para cada perfil (tabla 9). En general, el Fe se encuentra en mayor cantidad, tal vez por la gran cantidad de magnetita, principalmente. Luego le sigue el K, derivado de los feldespatos e illita, principalmente. Finalmente el Ti y luego el Zr, provenientes de los minerales más resistentes como las titanitas, entre otros. Nota: (se intuye la procedencia de dichos elementos, de éstos minerales que se encontraron, como ya vimos, en micromorfología y difracción, sin embargo, cabe resaltar que no se ha hecho un análisis mineralógico exhaustivo).

**Tabla 9. Concentraciones totales de Kg m<sup>-2</sup>/horizonte de K, Fe, Ti y Zr.**

Perfil	horizonte	Total en Kg m <sup>-2</sup>			
		K	Fe	Ti	Zr
Playa Cocoteros (PC)	AC	0.78	4.47	0.48	0.07
	C <sub>1</sub>	16.68	59.66	5.85	0.56
	C <sub>2</sub>	12.87	90.69	8.76	0.98
Cocoteros (CT)	A <sub>1</sub>	1.56	4.33	0.44	0.07
	A <sub>2</sub>	4.17	13.50	0.83	0.14
	C <sub>1</sub>	15.10	36.01	3.37	0.46
	C <sub>2</sub>	18.03	67.86	5.69	1.14
	Cg <sub>1</sub>	3.09	10.62	0.88	0.11
	Cg <sub>2</sub>	2.21	4.63	0.34	0.04



Rancho Magdalena 2 (RM <sub>2</sub> )	A	12.08	24.45	2.21	0.28
	AC	1.68	4.12	0.37	0.05
	BC	1.25	12.20	0.62	0.13
	C	9.80	21.02	1.96	0.20
	Cg <sub>1</sub>	5.16	8.73	0.71	0.06
	Cg <sub>2</sub>	7.81	22.41	1.76	0.28
	Cg <sub>3</sub>	0.95	7.18	0.86	0.34
	Cg <sub>4</sub>	2.16	4.99	0.33	0.05
Simón Sarlat (SS)	A <sub>1</sub>	3.40	20.60	2.34	0.34
	A <sub>2</sub>	2.00	10.98	1.23	0.24
	Bw <sub>1</sub>	6.08	28.35	3.86	0.69
	Bw <sub>2</sub>	3.37	22.05	2.49	0.57
	BCg	9.44	46.66	5.98	0.95
	G	6.70	17.59	3.36	0.25

### IV.3.9.1 Relación Ti/Zr

La razón de Ti y Zr es considerada como indicador de discontinuidades en el material parental. Valores similares indican homogeneidad y entre mayor sea la diferencia entre un valor y otro, más heterogéneos son. La figura 28 nos muestra pequeñas discontinuidades para PC, CT y SS, sin embargo, en RM<sub>2</sub> existe una diferencia más grande, ya que conforme aumenta la profundidad en el perfil, se notan tres paquetes sedimentarios con relaciones Ti/Zr distintas: el primero va de A a BC, el segundo de C a Cg<sub>3</sub> y el último comienza en Cg<sub>4</sub>.

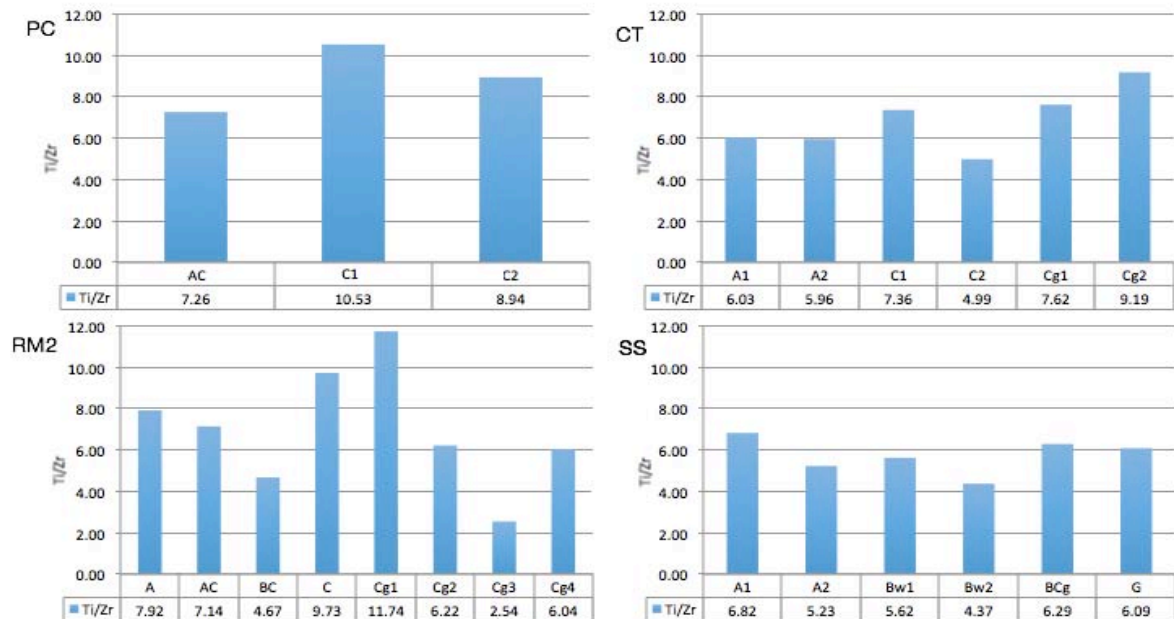


Figura 28. Valores de la relación Ti/Zr en horizontes de la cronosecuencia, indicando discontinuidades.

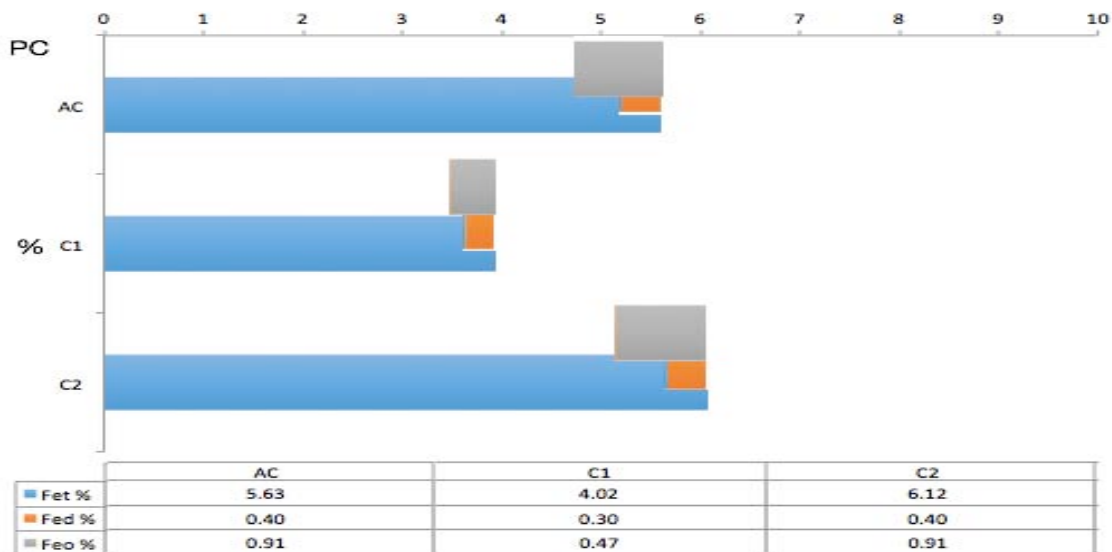
### IV.3.10 Fe pedogénico: extracciones selectivas de Fe con citrato- bicarbonato-ditionito y oxalato de amonio.

Retomando la explicación sobre el Fe<sub>d</sub> (Fe extraído con ditionito) y Fe<sub>o</sub> (Fe extraído con oxalato) y las relaciones Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub> (indicador de pedogénesis); Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> (indicador de la relación entre Fe amorfo y Fe cuasi-cristalino), hechas en el marco teórico,

veamos el comportamiento de las gráficas %Fe<sub>t</sub>-%Fe<sub>d</sub>-%Fe<sub>o</sub>, y Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub> - Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub>, para cada perfil.

#### IV.3.10.1 Playa Cocoteros

En la figura 29, se muestran los valores, en porcentaje, de Fe total (Fe<sub>t</sub>), Fe extraído con ditionito (Fe<sub>d</sub>) y Fe extraído con oxalato (Fe<sub>o</sub>). Inmediatamente salta a la vista el hecho que el Fe<sub>o</sub> es mayor que el Fe<sub>d</sub> (figs. 29 y 30), (hecho ilógico), siendo Fe<sub>o</sub> hasta el doble que Fe<sub>d</sub>. Sin embargo, éste es un fenómeno que causa la extracción con oxalato, en algunos materiales parentales (este problema lo trataremos en la discusión).



**Figura 29. Perfil Playa Cocoteros: comparación de los valores de Fe<sub>o</sub> con el Fe<sub>d</sub> y Fe<sub>d</sub> con el Fe<sub>t</sub>. En este perfil se presenta el problema de tener mayor valor en Fe<sub>o</sub> que en Fe<sub>d</sub>, lo que es ilógico, pues Fe<sub>d</sub> es el Fe pedogénico y Fe<sub>o</sub> es el Fe amorfo, entonces la diferencia de Fe<sub>o</sub> con Fe<sub>d</sub> debe dar positiva e indicar la cantidad de Fe cristalino (ver marco teórico).**

En cuanto a las relaciones (fig. 30), podemos ver que la pedogénesis (Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub>) es muy insipiente, con valores muy bajos (tabla 10), en cambio Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> (Fe amorfo) es considerablemente superior, sin embargo es por el caso comentado de la extracción por oxalato. De acuerdo a la figura 30, es un perfil en el que la formación de suelo, está en sus inicios.

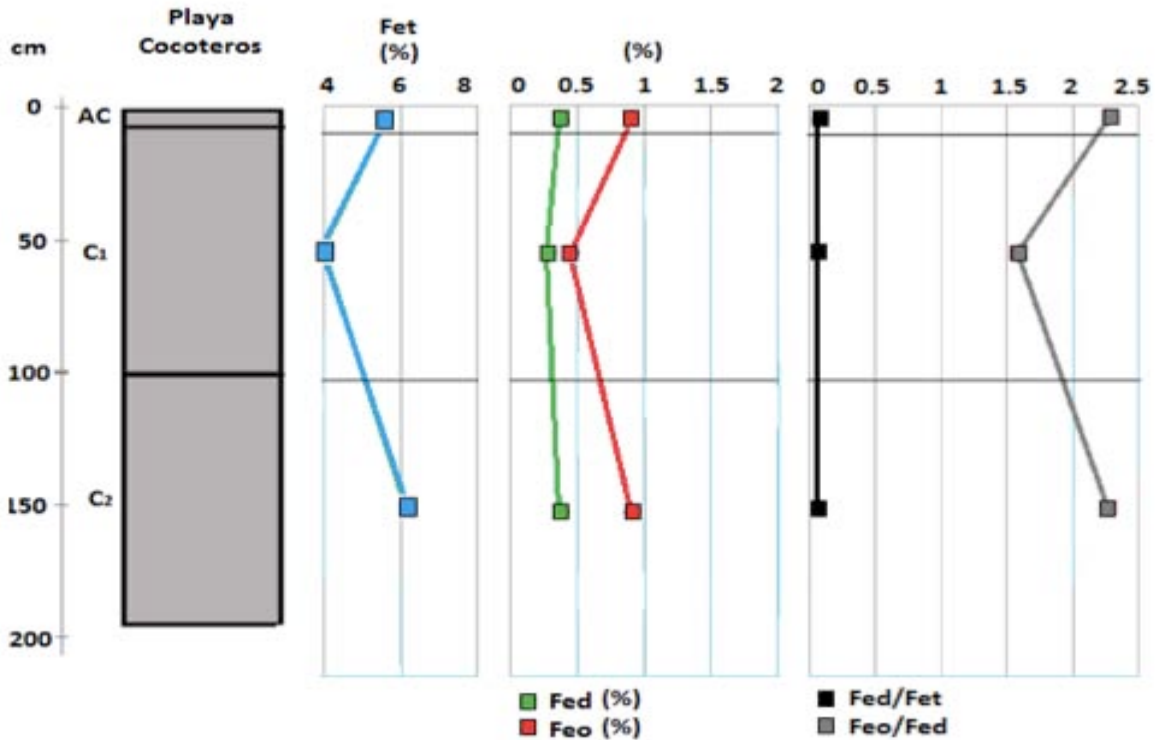


Figura 30. Perfil Playa Cocoteros: comparación, en perfil, de valores de  $F_{et}$ %,  $F_{ed}$ %,  $F_{eo}$ %,  $F_{ed}/F_{et}$  y  $F_{eo}/F_{ed}$ .

Esta misma tendencia se refleja en las cantidades en kilogramo por volumen de suelo (fig. 31), ya que estos están sacados del mismo porcentaje, sin embargo muestran la acumulación de  $F_{ed}$  y  $F_{eo}$  en los horizontes, de esta manera podemos ver que los kg de  $F_{eo}$  son en algunos casos el doble que  $F_{ed}$ , llegando a  $13.45 \text{ kg m}^{-2}$  de  $F_{eo}$ , contra  $5.93 \text{ kg m}^{-2}$  en  $F_{ed}$ .

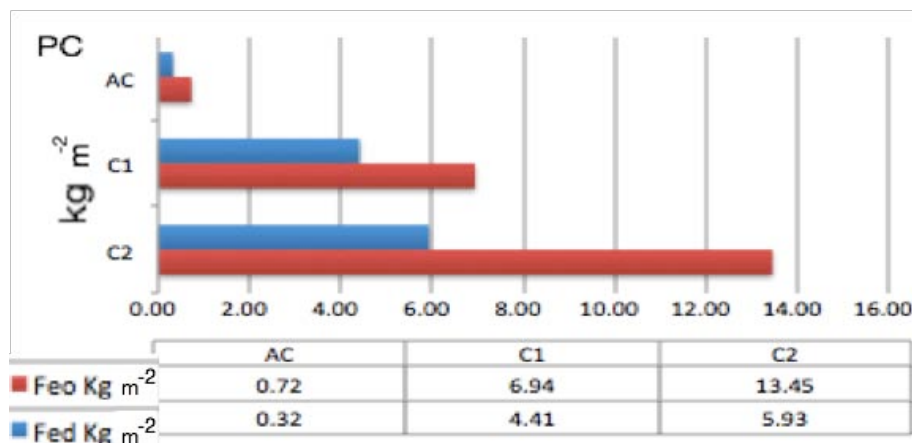


Figura 31. Perfil Playa cocoteros: comparación de los valores kilogramo de  $F_{ed}$  y  $F_{eo}$ .

### IV.3.10.2 Cocoteros

En este perfil parece haber desaparecido el caso especial producto de la extracción por oxalato, pues todos los horizontes mantienen el  $Fe_o$  por debajo de  $Fe_d$ , a excepción de  $C_2$ , que tiene un poquito arriba el valor de  $Fe_o$ . No obstante, en este perfil se comienza a ver un avance en la pedogénesis, ya que existe  $Fe$  recién formado ( $Fe_o$ ) y un poco de  $Fe$  cristalino ( $Fe_d - Fe_o$ ) (fig. 32).

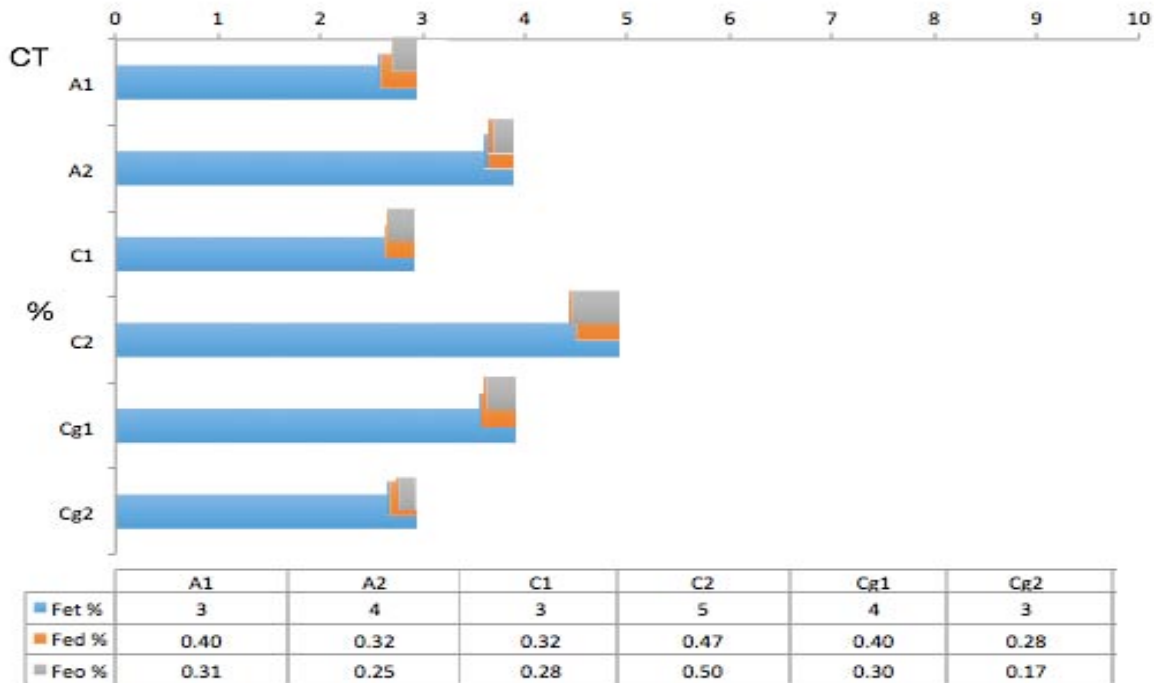


Figura 32. Perfil Cocoteros: comparación de los valores de  $Fe_o$  con el  $Fe_d$  y  $Fe_d$  con el  $Fe_t$ .

CT tiene una pedogénesis de poco desarrollo, pero que ya es significativa, pues analizando los porcentajes (figs. 32 y 33) y las relaciones (tabla 10 y fig. 33), vemos que hay poca pedogénesis ( $Fe_d / Fe_t$ ) y la que hay, es en su mayoría de reciente formación ( $Fe_o$ : amorfo). Es por esto, que las gráficas de  $Fe_d$  % y  $Fe_o$  % (fig. 33) son muy similares y de valores muy cercanos, tanto que casi se empalman.

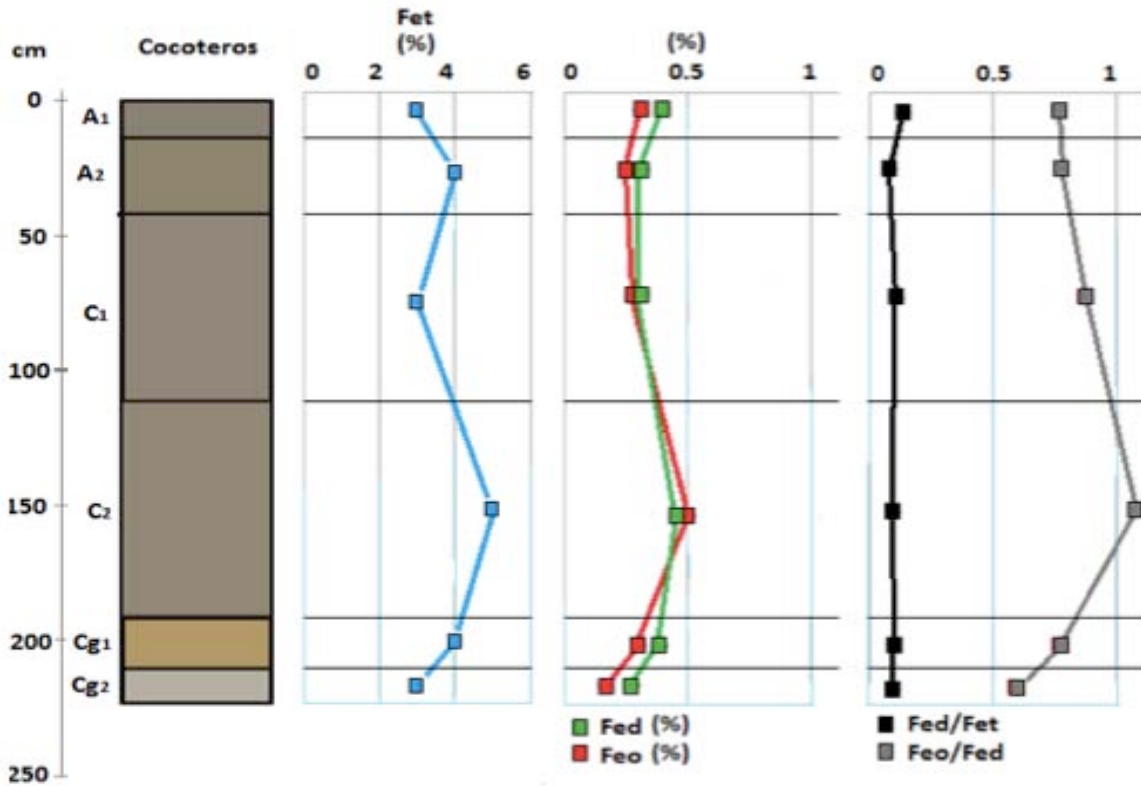


Figura 33. Perfil Cocoteros: comparación, en perfil, de valores de  $Fe_t\%$ ,  $Fe_d\%$ ,  $Fe_o\%$ ,  $Fe_d/Fe_t$  y  $Fe_o/Fe_d$ .

Expresado en  $Kg\ m^{-2}$ , se tiene la misma respuesta (fig. 34). En cuestión de acumulación de  $Fe_d$  o  $Fe_o$ , los horizontes C son los principales, dando un pico en el centro del perfil (horizonte  $C_2$ , en fig. 34).

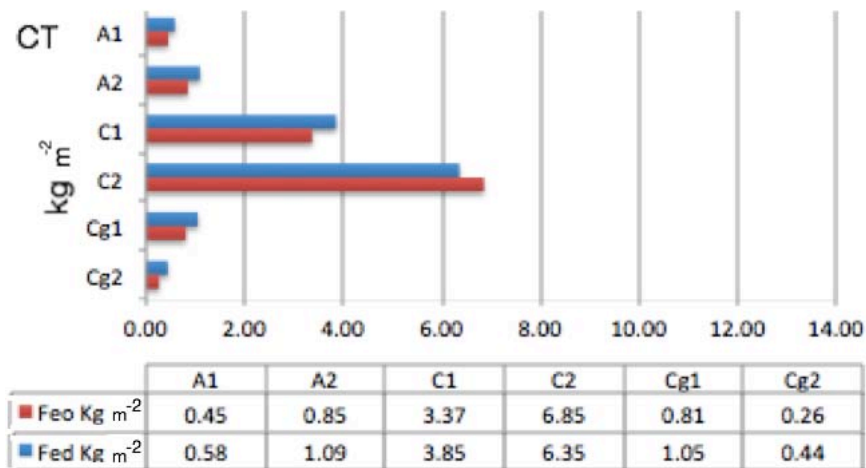


Figura 34. Perfil Cocoteros: comparación de los valores kilogramo de  $Fe_d$  y  $Fe_o$ .

### IV.3.10.3 Rancho Magdalena 2

Para este perfil la pedogénesis es ya muy evidente, pues los valores de  $Fe_o$  están por debajo de  $Fe_d$ , siendo este último el doble, lo que indica que los óxidos pedogénicos están presentes en casi la misma cantidad que los amorfos (fig. 35).

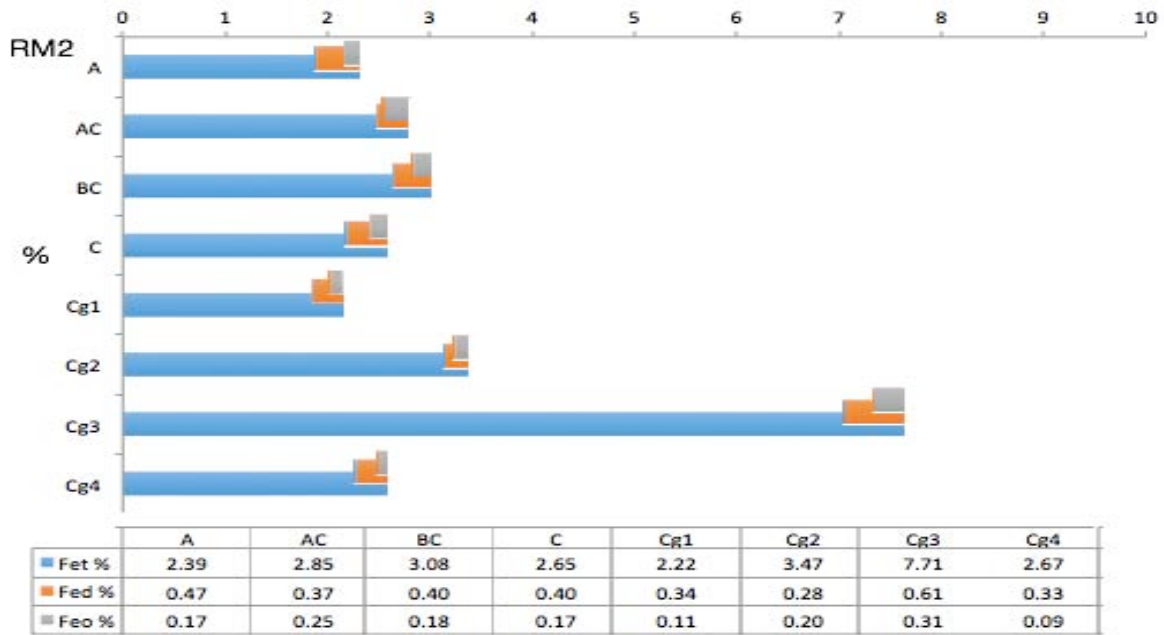


Figura 35. Perfil Rancho Magdalena 2: comparación de los valores de  $Fe_o$  con el  $Fe_d$  y  $Fe_d$  con el  $Fe_t$ .

Identificando los horizontes de mayor avance de pedogénesis, por medio de  $Fe_d/Fe_t$  y  $Fe_o/Fe_d$  (fig. 36 y tabla 10), vemos que son: A, BC, C, Cg<sub>1</sub> y Cg<sub>4</sub>. Ya que son los puntos en donde  $Fe_d/Fe_t$  aumenta y  $Fe_o/Fe_d$  disminuye, dejándonos encontrar los puntos de mayor concentración de óxidos cristalinos.

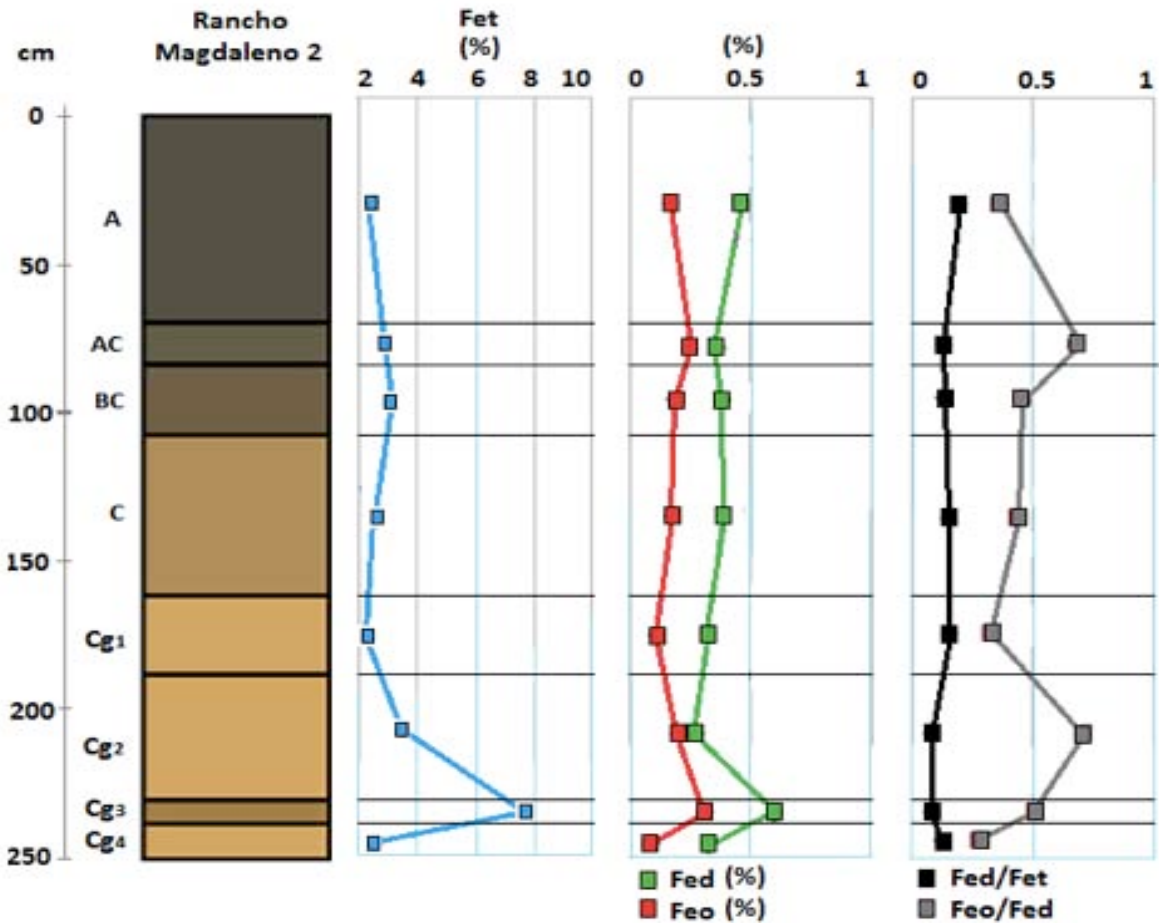


Figura 36. Perfil Rancho Magdalena 2: comparación, en perfil, de valores de Fe<sub>t</sub>%, Fe<sub>d</sub>%, Fe<sub>o</sub>%, Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub> y Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub>.

En Kg m<sup>-2</sup> pareciera que la respuesta no es la misma, pues el horizonte A y C concentran gran cantidad de óxidos de Fe del perfil, sin embargo, esto responde al espesor del horizonte, pues A y C son los más grandes del perfil, por lo que acumulan mayor cantidad de óxidos de Fe (fig. 37).



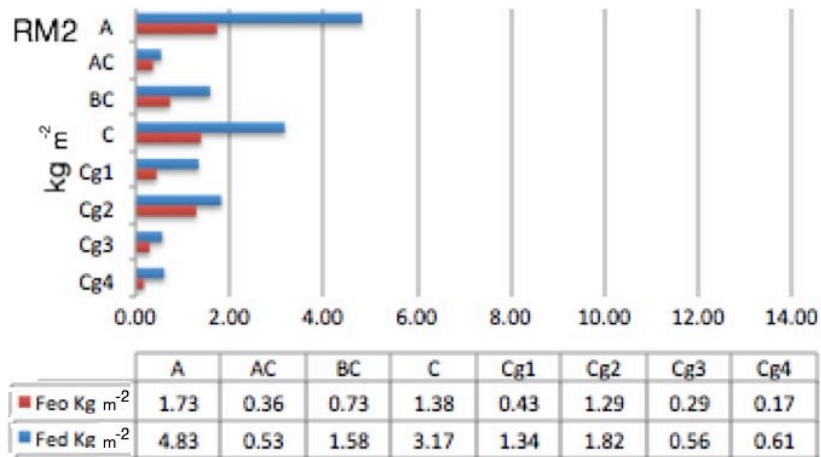


Figura 37. Perfil Rancho Magdalena 2: comparación de los valores kilogramo de Fe<sub>d</sub> y Fe<sub>o</sub>.

#### IV.3.10.4 Simón Sarlat

Evidentemente este es el perfil de mayor desarrollo pedogénico. Observamos en la figura 38, como Fe<sub>d</sub> es ya mucho mayor que Fe<sub>o</sub>, lo que se traduce en mayor cantidad de Fe cristalino, por lo tanto mayor tiempo de pedogénesis.



Figura 38. Perfil Simón Sarlat: comparación de los valores de Fe<sub>o</sub> con el Fe<sub>d</sub> y Fe<sub>d</sub> con el Fe<sub>t</sub>.

Y como horizontes de mayor pedogénesis (fig. 39 y tabla 10) tenemos a:  $Bw_1$ ,  $Bw_2$ ,  $BCg$  y  $Cr$ . Pero en  $BCg$ , tenemos el mayor desarrollo de pedogénesis no solo del perfil sino de la cronosecuencia, ya que la relación  $Fe_d/Fe_t$  es, incluso, más alta que  $Fe_o/Fe_d$ , lo que significa que casi todos los óxidos de Fe pedogénicos son cristalinos.

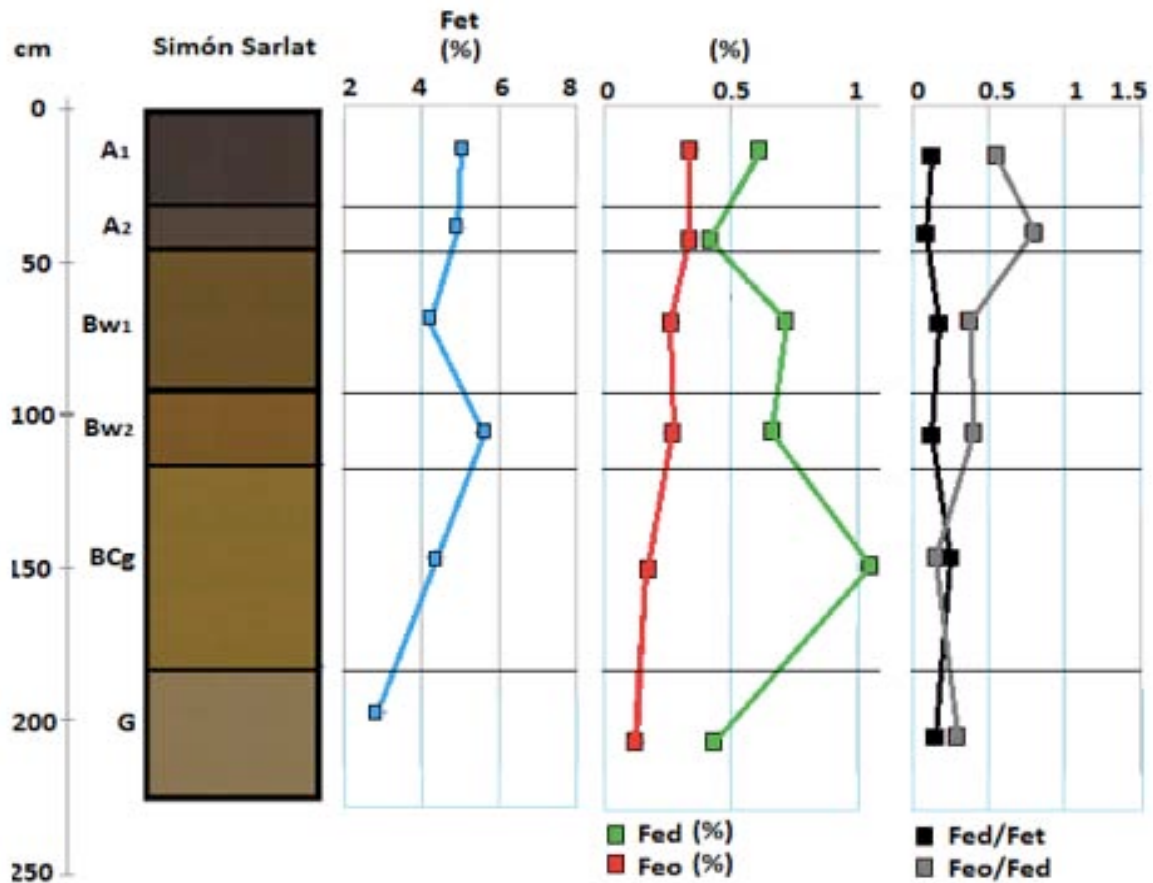


Figura 39. Perfil Simón Sarlat: comparación, en perfil, de valores de  $Fe_t$  %,  $Fe_d$  %,  $Fe_o$  %,  $Fe_d/Fe_t$  y  $Fe_o / Fe_d$ .

Los cálculos en  $Kg\ m^{-2}$  (fig. 40) coinciden con los perfiles de mayor desarrollo de pedogénesis, pues  $Bw_1$  y  $BCg$  cuentan con la mayor acumulación de óxidos de Fe del perfil, siendo éstos en su mayoría cristalinos.

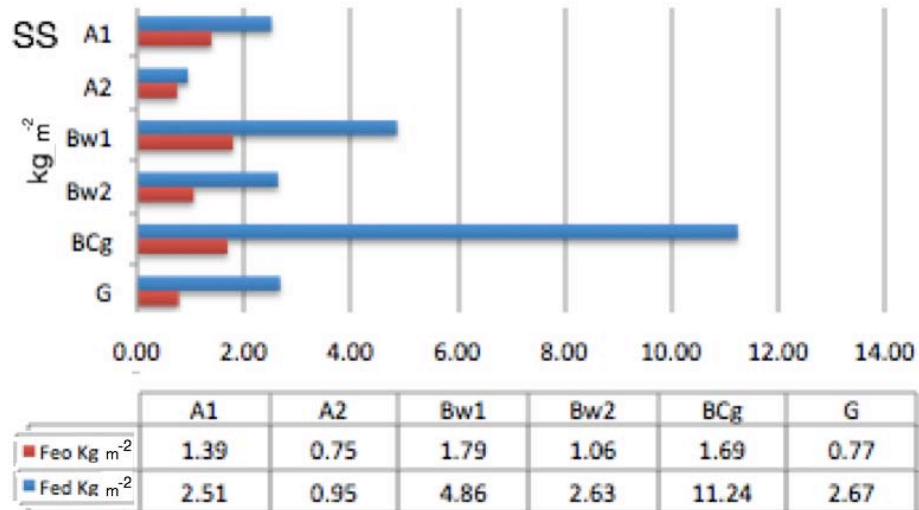


Figura 40. Comparación de los valores kilogramo de Fe<sub>d</sub> y Fe<sub>o</sub>.

Tabla 10. Valores de las relaciones Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub> y Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub>.

Perfil	horizonte		
		Fe <sub>d</sub> /Fe <sub>t</sub>	Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>
Playa Cocotereros (PC)	AC	0.071	2.28
	C <sub>1</sub>	0.074	1.58
	C <sub>2</sub>	0.065	2.27
Cocotereros (CT)	A <sub>1</sub>	0.13	0.77
	A <sub>2</sub>	0.08	0.78
	C <sub>1</sub>	0.11	0.87
	C <sub>2</sub>	0.09	1.08
	Cg <sub>1</sub>	0.10	0.77

	Cg <sub>2</sub>	0.09	0.59
Rancho Magdalena 2 (RM2)	A	0.20	0.36
	AC	0.13	0.68
	BC	0.13	0.46
	C	0.15	0.44
	Cg <sub>1</sub>	0.15	0.32
	Cg <sub>2</sub>	0.08	0.71
	Cg <sub>3</sub>	0.08	0.51
	Cg <sub>4</sub>	0.12	0.27
Simón Sarlat (SS)	A <sub>1</sub>	0.12	0.55
	A <sub>2</sub>	0.09	0.79
	Bw <sub>1</sub>	0.17	0.37
	Bw <sub>2</sub>	0.12	0.40
	BCg	0.24	0.15
	Cr	0.15	0.29

Entonces, vemos que en PC los óxidos pedogénicos son amorfos en su totalidad; en CT se encuentra ya una pequeña porción de Fe cristalino; para RM<sub>2</sub>, la relación entre Fe cristalino y amorfo es 1:1; y en SS, la fracción cristalina supera ya la amorfa, con un promedio de relación de 4:1.

#### IV.3.11 Susceptibilidad Magnética

De acuerdo a los valores de susceptibilidad magnética ( $X_{lf}$ ) y dependencia de frecuencia ( $X_{fd}$ ) de la tabla 11 (en anexos), graficados en las figura 41, podemos interpretar lo siguiente: en general, PC presenta los valores de  $X_{lf}$  más altos, en relación a los demás perfiles, por lo que supone mayor concentración de minerales magnéticos (como Fe). Por su parte,  $X_{fd}$  al ser de valores bajos, muestra que se trata de una secuencia sedimentaria (capas), más que horizontes de un suelo, por lo tanto no propone pedogénesis, así los valores marcados por  $X_{lf}$  nos hablan de minerales primarios magnéticos, en su mayoría, no pedogénicos; en CT, se mantiene elevada  $X_{lf}$ , y  $X_{fd}$  baja, por lo que es la misma situación que en PC;  $RM_2$  cambia completamente los valores, pues  $X_{lf}$  disminuye, significando una menor cantidad de minerales primarios magnéticos, por su parte  $X_{fd}$  aumenta, por lo que nos habla de óxidos de Fe finos producto de la pedogénesis, lo cuales da valores por encima de 3. En este perfil vemos que hay pedogénesis, pero solo en la parte del solum; en SS, los valores de  $X_{lf}$  se mantienen bajos, sin embargo  $X_{fd}$  nos muestra como se da el avance de la pedogénesis, pues tiene valores por encima de 3 en varias partes de perfil, las cuales se agrupan dejando ver que el desarrollo de óxidos de Fe pedogénicos se está dando en el solum y en la parte redox.

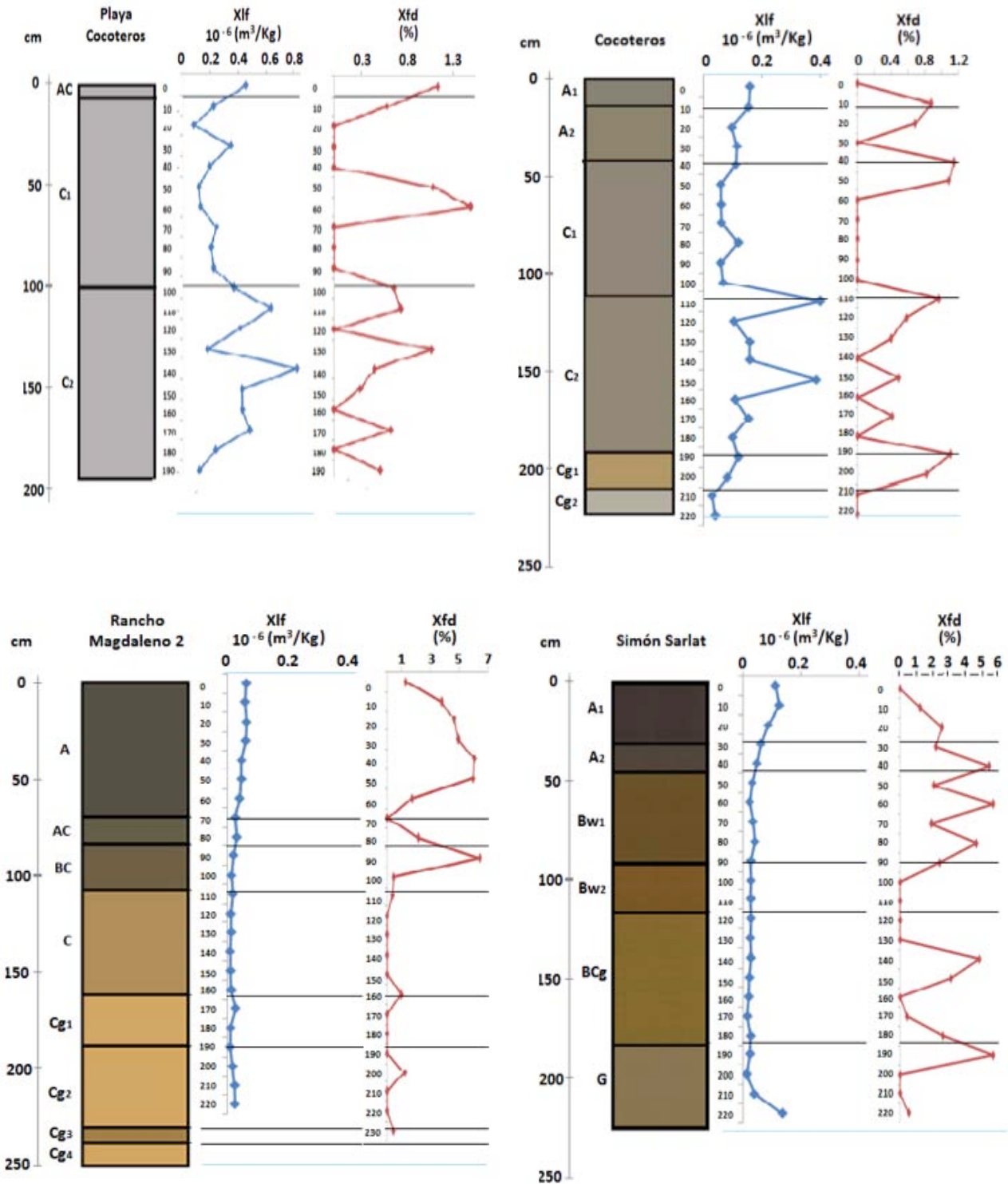


Figura 41. Gráficas de susceptibilidad magnética (Xlf) y dependencia de frecuencia (Xfd), para los perfiles de la cronosecuencia.

### IV.3.12 Gráficas Resumen

#### IV.3.12.1 Playa Cocoteros

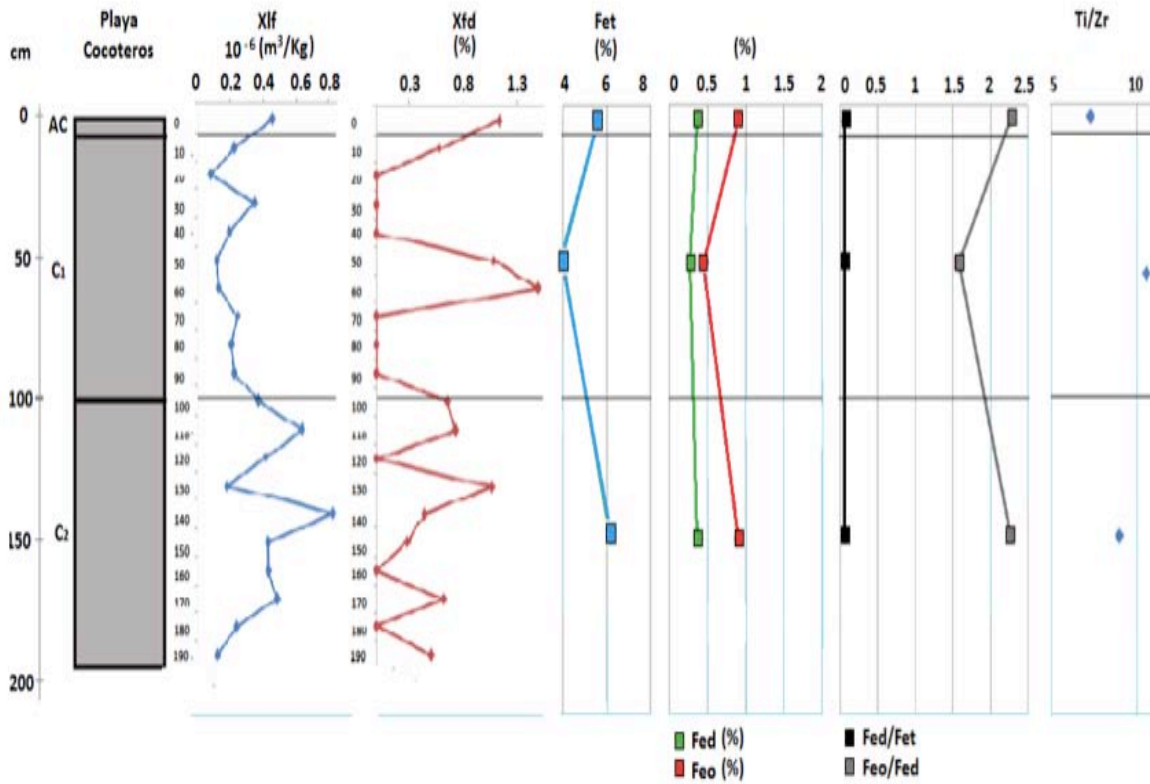


Figura 42. Gráfica resumen de Playa Cocoteros, con: profundidad, horizonte, color, susceptibilidad magnética (Xlf), dependencia de frecuencia (Xfd), % de  $\text{Fe}_t$ , % de  $\text{Fe}_d$ , % de  $\text{Fe}_o$ , Relaciones  $\text{Fe}_d/\text{Fe}_t$ -  $\text{Fe}_o/\text{Fe}_d$  y relación Ti/Zr.

### IV.3.12.2 Cocoteros

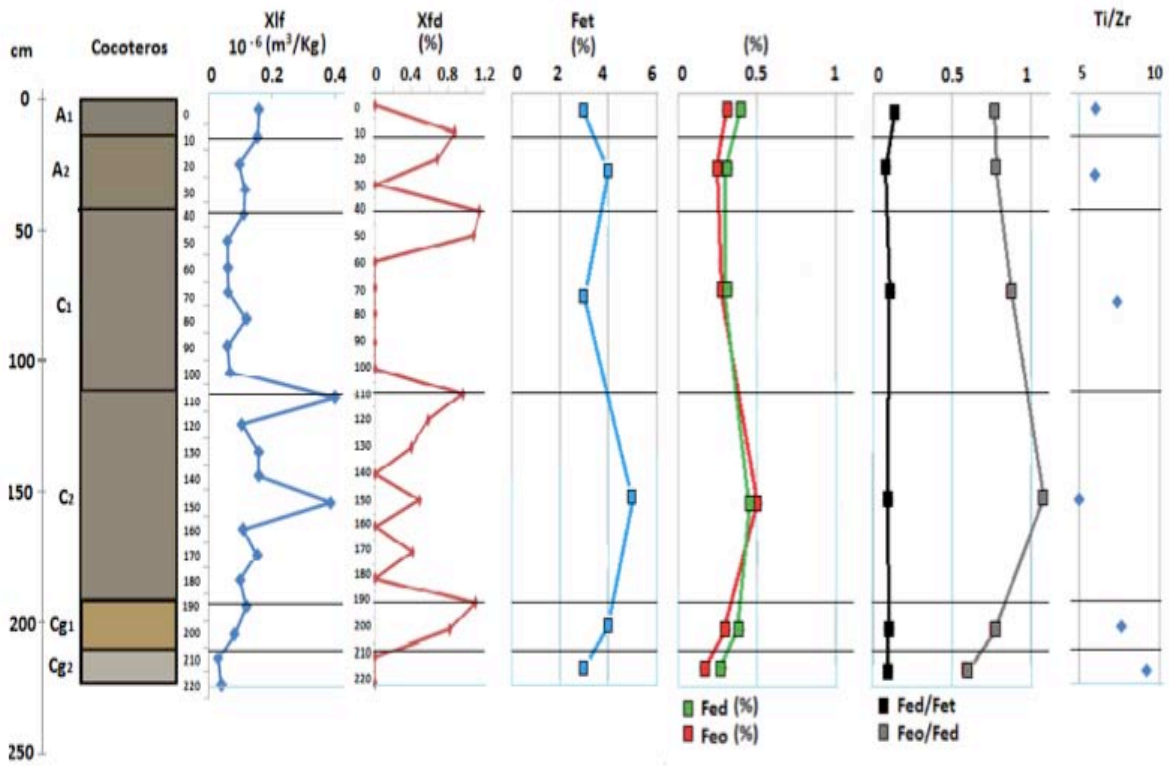


Figura 43. Gráfica resumen de Cocoteros, con: profundidad, horizonte, color, susceptibilidad magnética (Xlf), dependencia de frecuencia (Xfd), % de  $\text{Fe}_t$ , % de  $\text{Fe}_d$ , % de  $\text{Fe}_o$ , Relaciones  $\text{Fe}_d/\text{Fe}_t$ -  $\text{Fe}_o/\text{Fe}_d$  y relación Ti/Zr.



### IV.3.12.3 Rancho Magdalena 2

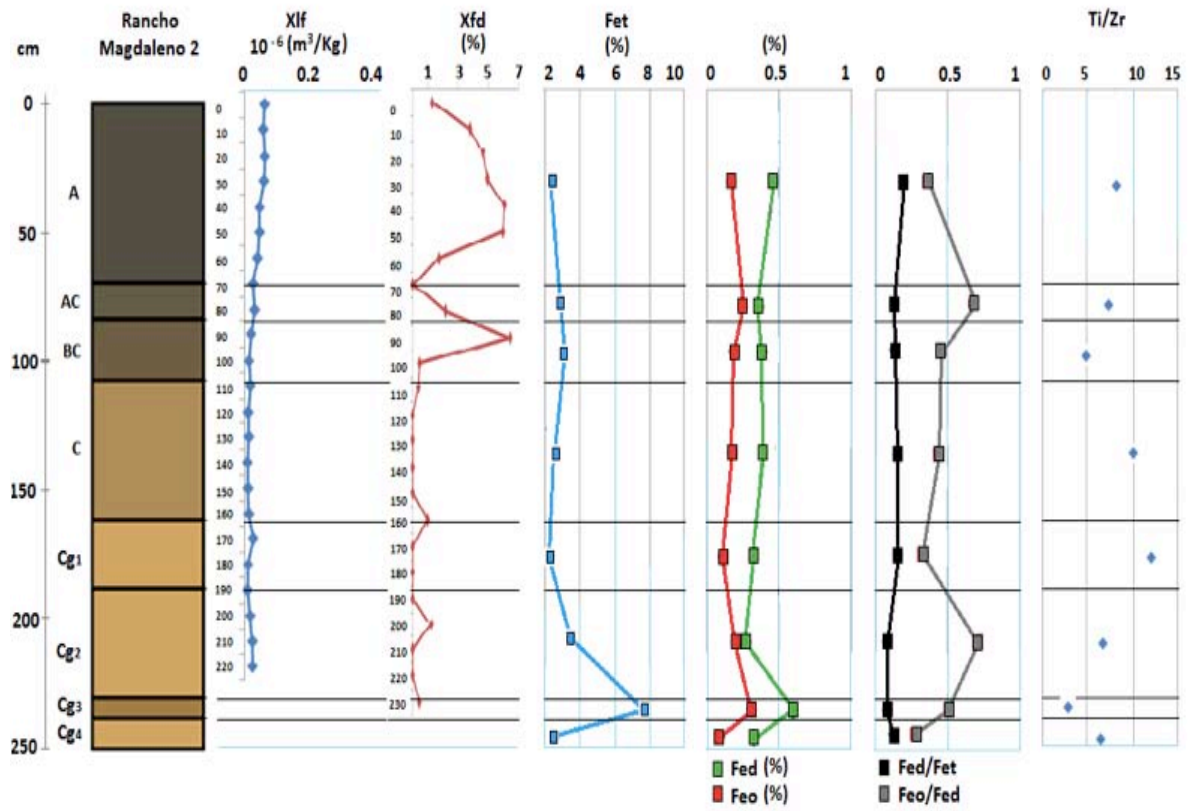


Figura 44. Gráfica resumen de Rancho Magdalena 2, con: profundidad, horizonte, color, susceptibilidad magnética (Xlf), dependencia de frecuencia (Xfd), % de Fe<sub>t</sub>, % de Fe<sub>d</sub>, % de Fe<sub>o</sub>, Relaciones Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub>- Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> y relación Ti/Zr.

#### IV.3.12.4 Simón Sarlat

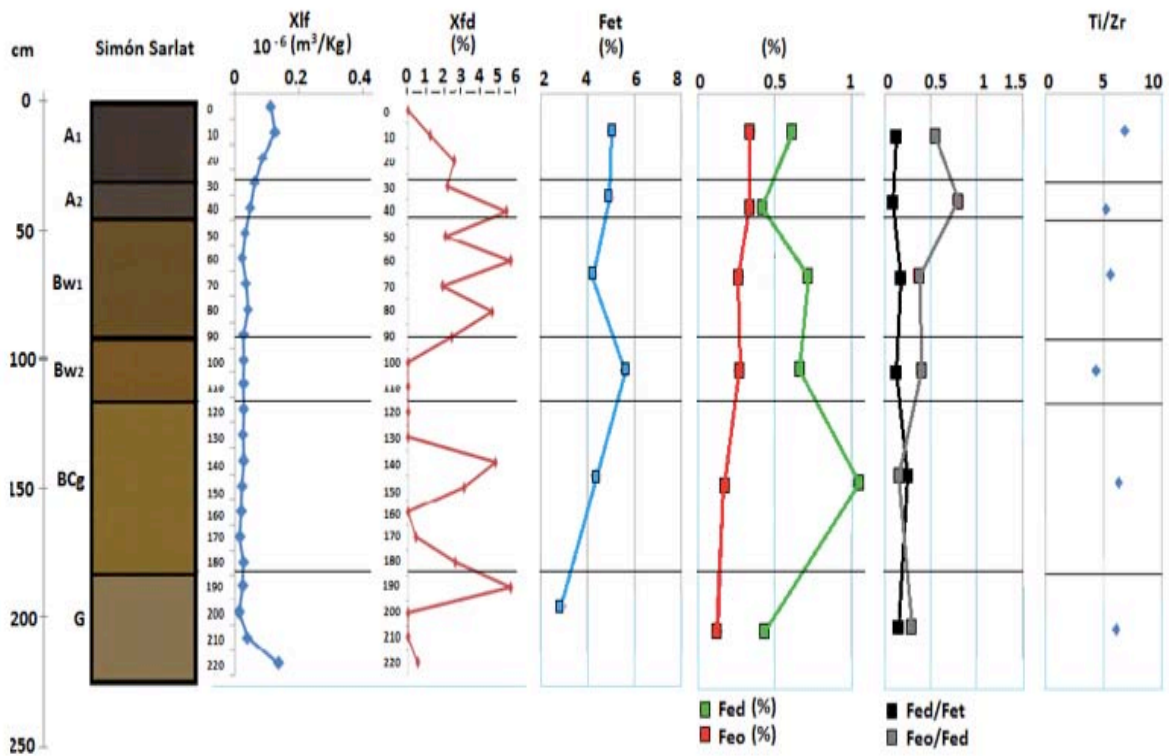


Figura 45. Gráfica resumen de Simón Sarlat, con: profundidad, horizonte, color, susceptibilidad magnética (Xlf), dependencia de frecuencia (Xfd), % de Fe<sub>t</sub>, % de Fe<sub>d</sub>, % de Fe<sub>o</sub>, Relaciones Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub>- Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> y relación Ti/Zr.

De acuerdo a todos los resultados anteriormente presentados, vemos el comportamiento de diferentes procesos pedogenéticos, tanto en cada perfil como a lo largo de la cronosecuencia. Esto permite entender la dinámica y estructuración, espacio temporal de cada perfil como miembro de una cronosecuencia.

## CAPÍTULO V

### Discusión

El suelo es un cuerpo natural que crece y disminuye en entropía relativamente, gracias a su capacidad sinérgica. Es decir, es un continuo verticalmente relacionado que, afectado por los factores formadores, desarrolla ciertas firmas pedogenéticas que lo caracterizan dándole un nombre (ej. Cambisol). Con el paso del tiempo los factores formadores dependientes cambian, pero de manera suficiente como para hacer que el desarrollo de ciertos procesos se vean afectados y cambien de dirección, dando lugar a otras firmas pedogenéticas que provocarán una evolución del sistema para luego darle otro nombre, de acuerdo a sus nuevas características.

Los suelos en su desarrollo y evolución acumulan la historia de diversas firmas pedogenéticas y por lo tanto, la constancia o cambio de los factores formadores dependientes.

Sin embargo, una vida humana o varias, que se dediquen a estudiar y seguir desde un principio algunos de los procesos formadores de suelo, no tendrían el suficiente tiempo para ver la mayoría de muchos de los procesos, ya que son del orden de cientos a miles e incluso millones de años. Por ello, estudiar una cronosecuencia de suelos, es la manera más factible para investigar su evolución y desarrollo (comunicación verbal del Dr. Sedov).

Este consejo se aplicó, aprovechando la formación de cordones litorales. En un primer momento se estableció la cronosecuencia por un método de selección relativo, basado en la interpretación del geosistema. Luego, apoyados en Ortíz-Pérez, et al., 2005; Psuty., 1965; y Aguayo, et al., 1999 se desentrañó la dinámica de formación del sistema de cordones. Posteriormente, gracias a las edades e imágenes Landsat proporcionadas por Nooren, et al., 2014, se estableció la cronosecuencia de una manera más exacta. Ya que, el tener datada la formación de algunos cordones y por

consecuencia el inicio de la pedogénesis de los suelos, nos ayuda a establecer los tiempos de desarrollo de los procesos pedogenéticos característicos de cada suelo a través de cronofunciones.

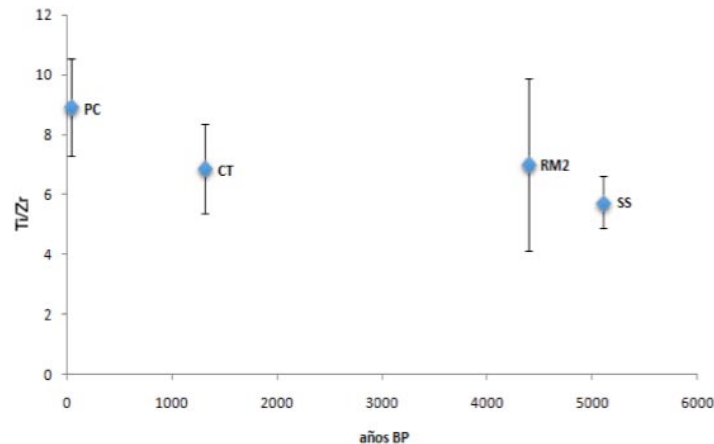
Dichas cronofunciones son estadísticamente relacionables en el tiempo establecido en la cronosecuencia. Ahora, se tiene un nivel de certeza mayor para el estudio de estos suelos, pues los valores que apoyan las cronofunciones son absolutos.

### **V.1 Homogeneidad del material parental y su estimado en volumen inicial**

Dentro de los factores formadores de suelo se encuentra el material parental, que es sobre el cual los demás factores formadores van a actuar para luego transformar. Como ya dijimos también, a excepción del factor tiempo, los demás factores formadores son no variables, condiciones que se toman en cuenta para establecer una cronosecuencia en el sentido estricto. Sin embargo, el devenir de lo aún no dominado ni conocido por el hombre (por ejemplo el clima), expresado en el cambio de la estructura de la realidad (entendida como el entorno físico) y su dinamismo, nos sugiere ser menos estrictos en la consideración de cada uno de los factores dependientes formadores de suelo que dan anisotropía a los suelos que integran la cronosecuencia.

Por consiguiente, en relación a la problemática de la homogeneidad del material parental, la cronofunción  $Ti/Zr$ , indica una pequeña discontinuidad en la cronosecuencia, ya que de acuerdo al error de correlación coinciden dentro de rango PC-CT-RM<sub>2</sub> y CT-RM<sub>2</sub>-SS, mientras que PC y SS no coinciden (fig. 46). Esto puede significar que CT y RM<sub>2</sub> son la zona transicional de la discontinuidad. Sin embargo, se podría considerar como una cronosecuencia relativamente homogénea ya que los rangos de error de correlación de PC y SS están muy cerca, además ambos comparten rango con CT y RM<sub>2</sub>. Además, la plataforma en donde se encuentran los cordones, está conformada predominantemente por sedimentos volcánico-lásticos (Nooren, *et al.*, 2014), que provienen de las cuencas de los ríos Grijalva y Usumacinta, y ambas nacen

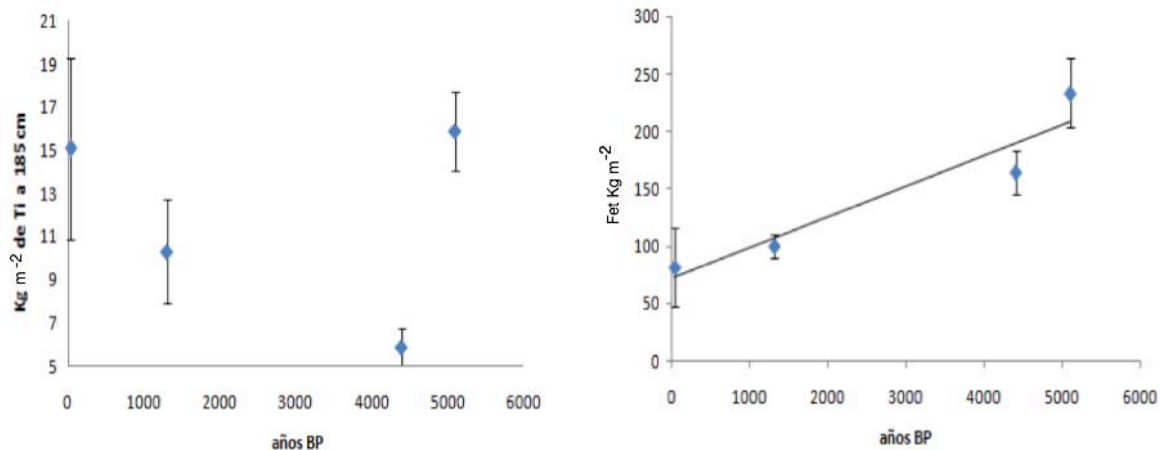
en el macizo rocoso de la Sierra de Chiapas y Guatemala. Otra evidencia de una relativa homogeneidad es la superposición que se puede establecer en los difractogramas de las muestras totales por difracción de rayos X, indicando una similitud en los materiales parentales (ver figura 19).



**Figura 46. Cronofunción (Valores promedio y desviación estándar) Ti/Zr, donde se aprecia la discontinuidad entre PC y SS, apoyado en las barras de error.**

Es importante también, para el desarrollo de la cronosecuencia, conocer el volumen inicial de sedimentos que conforman los cordones sobre los cuales se desarrollan los suelos, ya que con este aporte vienen adicionalmente materiales que darán un impulso a la pedogénesis (tema que ya hemos tocado un poco y veremos en apartados adelante).

Tomamos al Ti como indicador de volumen original del material parental (Ortega, 1981), y al compararlo con  $Fe_t$  (Fe total) vemos que coinciden, entonces, ambos pertenecen al mismo volumen inicial del material parental (fig. 47). Lo que nos asegura que aún no conociendo en cantidad el volumen real aportado, intuimos periodos de menor o mayor aporte entre los sedimentos sobre los cuales se desarrollan los suelos de la cronosecuencia.



**Figura 47. Relación entre la cronofunción de Kg m<sup>-2</sup> de Ti a 185cm (izquierda), como indicador de volumen original del material parental (Ortega, 1981) y Fe<sub>e</sub> (derecha). Mostrando las barra de error.**

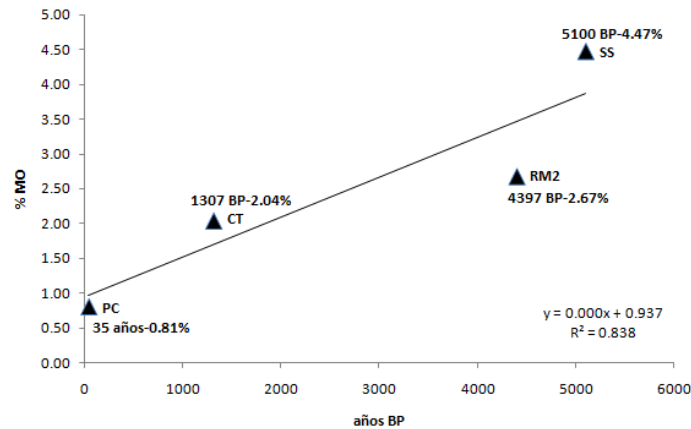
## V.2 Tendencia de la pedogénesis en la cronosecuencia.

Analizando los resultados obtenidos de cada perfil a través del tiempo y relacionándolos estadísticamente en la cronosecuencia, encontramos que la formación de suelo aumenta con el tiempo. Para esta interpretación, se toma en cuenta el valor porcentual de los resultados, además, se decidió apoyar los resultados con la densidad aparente, ya que por medio de ella se puede calcular cuantos Kg de algún indicador pedogenético existe por horizonte, tomando como referencia la proporción de profundidad del horizonte en 1m<sup>3</sup> de suelo. Luego se grafican en relación al tiempo en regresión lineal.

### V.2.1 Materia Orgánica

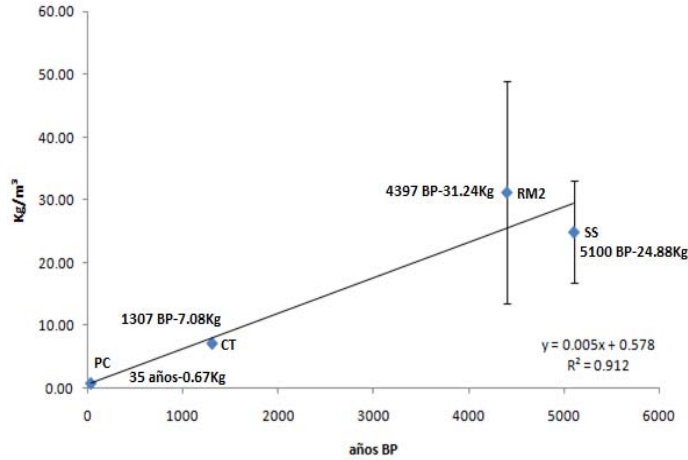
La materia orgánica (MO) tiene una tendencia a acumularse a través del tiempo. Graficando sólo los porcentajes de los horizontes A superficiales por perfil (fig. 48), se nota como la tendencia del modelo de regresión lineal es positiva, con un nivel de confianza dado por el coeficiente de correlación de  $R^2=0.838$ , pues el perfil Playa Cocoterros (PC) con sólo 35 años de desarrollo tiene un promedio de 0.81% de MO, Cocoterros (CT) con 1307 BP tiene un promedio de 2.04% MO, Rancho Magdalena 2

(RM<sub>2</sub>) con 4397 BP tiene un promedio de 2.67% MO, y Simón Sarlat (SS) con 5100 BP tiene un promedio de 4.47% MO.



**Figura 48. Línea de tendencia lineal positiva del modelo de regresión lineal ajustada al porcentaje de materia orgánica. Incluyendo ecuación y coeficiente de correlación.**

En cuanto a Kg m<sup>-2</sup> de MO por perfil y metro cuadrado en superficie (esto se determina sumando los kg de MO de cada horizonte A por perfil), se establece la misma tendencia positiva con un nivel de confianza de R<sup>2</sup>=0.912 (fig. 49), ya que PC acumuló 0.67 Kg m<sup>-2</sup>, CT con 7.08 Kg m<sup>-2</sup>, RM<sub>2</sub> con 31.24 Kg m<sup>-2</sup> y SS con 24.88 Kg m<sup>-2</sup>. Sin embargo, RM<sub>2</sub> presenta mayor cantidad de materia orgánica que SS que es el de mayor edad. Esto se le atribuye, a que la suma de los horizontes A-AC de RM<sub>2</sub> es de 80 cm y A<sub>1</sub>-A<sub>2</sub> de SS es sólo de 45 cm, entonces, RM<sub>2</sub> tiene un horizonte A más profundo y por lo tanto mayor acumulación de MO a pesar de ser 703 años mas joven que SS. Sin embargo, el hecho es que RM<sub>2</sub> ha acumulado más materia orgánica.

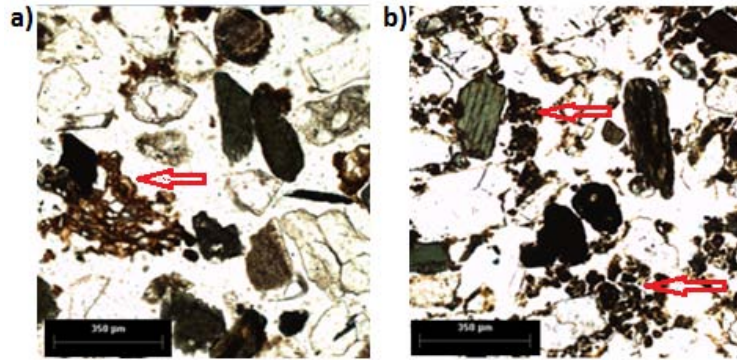


**Figura 49. Línea de tendencia lineal positiva del modelo de regresión ajustado a las cantidades de materia orgánica en Kg m<sup>-2</sup> por perfil en horizontes A. Con ecuación, coeficiente de correlación y error de correlación.**

Parecería que en RM<sub>2</sub> y SS podrían ser el inicio del periodo de madurez de este proceso pedogenético, pues cumple con el tiempo característico establecido que es del orden de 10<sup>3</sup> años (Targulian y Krasilnikov, 2007), no obstante, para esta hipótesis sería necesario hacer muestreos de perfiles en cordones más antiguos, que demuestren la tendencia y por ende el grado de madurez (o de analizar un mayor número de perfiles por cordón...). Por otro lado, la tasa de acumulación (fig. 51) y el hecho de que ha sido un área impactada fuertemente por el hombre desde los pueblos prehispánicos hasta la actualidad (Becerra, 1987; citado por Velázquez, 1994), apuntan a un proceso en el que no se ve claro el inicio de una cuasi-estabilidad, como lo esperaríamos para más de 5000 años de pedogénesis (Schaeztl y Thompson, 2015).

El que haya materia orgánica en una cantidad específica, no significa más desarrollo, ya que, se puede acumular MO fresca, con poca alteración, que aún no esta humificada. Esto lo vemos comparando la materia orgánica en las láminas delgadas de PC y SS, del más joven al más antiguo, respectivamente (fig. 50). En PC, la MO es fresca con poca alteración y se ven aún las estructuras poco degradadas de la materia original, en cambio, en SS se encuentra ya humificada y en agregados.

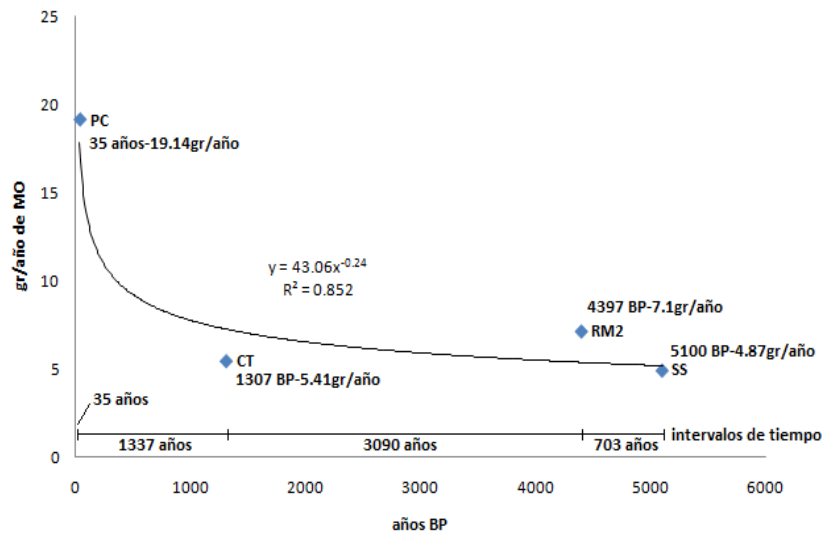




**Figura 50. Análisis micromorfológico de láminas delgadas. El a) es el horizonte AC de PC (perfil más joven), en donde la flecha señala la materia orgánica fresca, donde al parecer se notan algunos tejidos de la estructura original. El b) se refiere al horizonte A<sub>1</sub> de SS (perfil más viejo), en donde las flechas indican algunos de los muchos agregados en los que se encuentra la materia orgánica ya humificada.**

Por otro lado, la tasa de acumulación de MO en PC es de 19.14 gr/año, en los perfiles intermedios se tiene CT con 5.41 gr/año, RM<sub>2</sub> con 7.1 gr/año y en SS de 4.87gr/año. Se puede ver que en CT-RM<sub>2</sub>-SS las tasas son relativamente cercanas, por el contrario, PC dispara la tasa de acumulación. Pensamos que esta rápida acumulación se debe al tiempo en el que se expone el cordón a las condiciones específicas que le ofrece la cercanía del mar, lo cual condiciona el aporte de MO proveniente con la sedimentación, propia de la dinámica de formación de cordones, así como a la acarreada por acción eólica, y de la propia fauna y vegetación pionera. Una vez que la misma dinámica deja a los cordones tierra adentro, estos tienen la oportunidad de desarrollarse con condiciones diferentes, dando mayor estabilidad y por lo tanto a los procesos formadores de suelo.

Analizando la gráfica de línea de tendencia potencial, ya que es la de mayor ajuste con un nivel de confiabilidad de  $R^2=0.852$ , expresa una tendencia a estabilizar la tasa de acumulación en el tiempo (fig. 51). Es importante mencionar que la tasa de

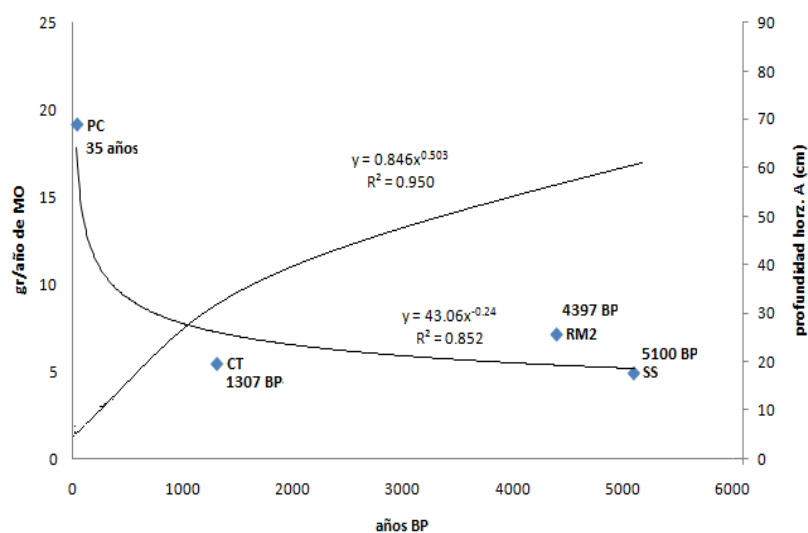


**Figura 51. Línea de tendencia potencial negativa del modelo de regresión ajustada a la tasa de acumulación en materia orgánica por año. Mostrando ecuación, coeficiente de correlación e intervalos de tiempo.**

acumulación no es la tasa de humificación, pero sabemos que sí existe acumulación de humus, por análisis micromorfológico y color obscuro del horizonte, en los perfiles CT-RM<sub>2</sub>-SS y no solo pura acumulación de MO fresca como en PC.

Así, reuniendo elementos sobre la MO, podemos afirmar que la tendencia de este proceso pedogenético es positiva, lo que significa que dentro de la dinámica específica de esta cronosecuencia de suelos, el tiempo de exposición muy próximo al mar determina la pedogénesis de toda la cronosecuencia. Cuando recién se forma el cordón, la acumulación de MO es relativamente alta en un periodo corto de tiempo, como en el caso de PC que en 35 años tiene una acumulación de 0.67 kg lo que da una tasa alta de 19.14 gr/año (ver fig. 51). Pero una vez que el cordón ha quedado tierra adentro y comienza a estabilizarse el sistema, entonces se da un decremento en la tasa de acumulación de materia orgánica debido al cambio de mecanismos de acumulación y humificación, como lo vemos en SS con más estabilidad.

Entonces, proponemos un sistema de funcionamiento para los procesos de acumulación, degradación y humificación de la materia orgánica en este pedosistema en cordones litorales. La tasa de acumulación de MO en el suelo del cordón próximo al mar (PC) es muy rápida, posteriormente, decrece significativamente en CT-RM<sub>2</sub>-SS pero la degradación y sobre todo la humificación aumentan, lo que se refleja en el desarrollo de horizontes A cada vez mejor estructurados y más profundos (45-70cm) que concentra mayor cantidad de materia orgánica a través del tiempo, dando un mayor espesor. Esto es, la tasa de acumulación general disminuye conforme el espesor aumenta (fig. 52), por lo tanto también la cantidad en kg de MO.



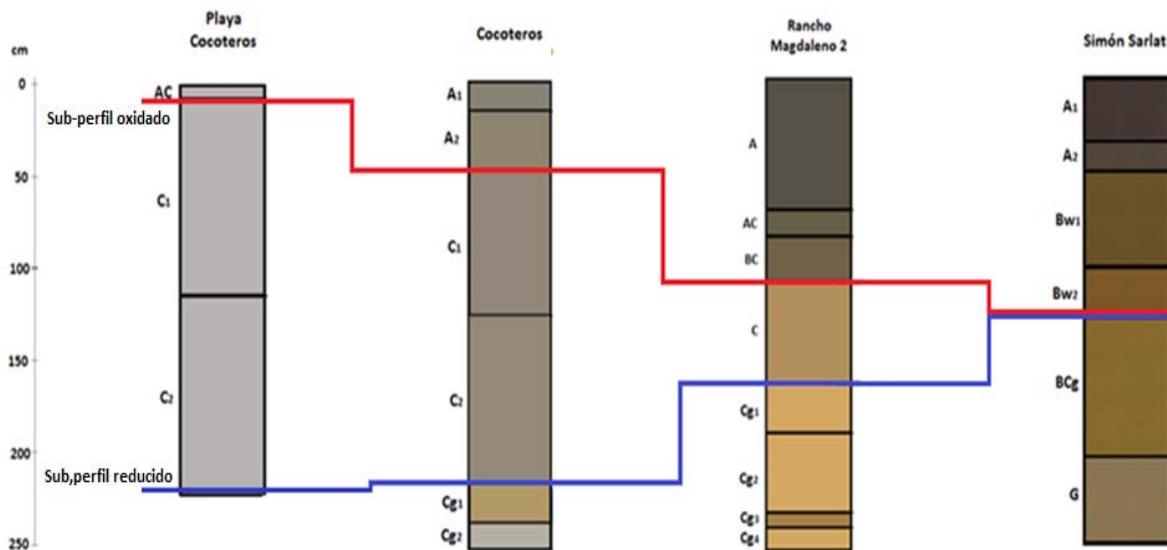
**Figura 52. Líneas de tendencia de los modelos de regresión ajustados a los datos de espesor de los horizontes A en el tiempo (línea de tendencia positiva), y la tasa de acumulación en gramos de MO por año (la línea de tendencia negativa). Mostrando formulas y coeficiente de correlación.**

Así, la pedogénesis expresada en este proceso de acumulación, degradación y humificación de la materia orgánica avanza en la cronosecuencia.

### V.2.2 Óxidos de Fe

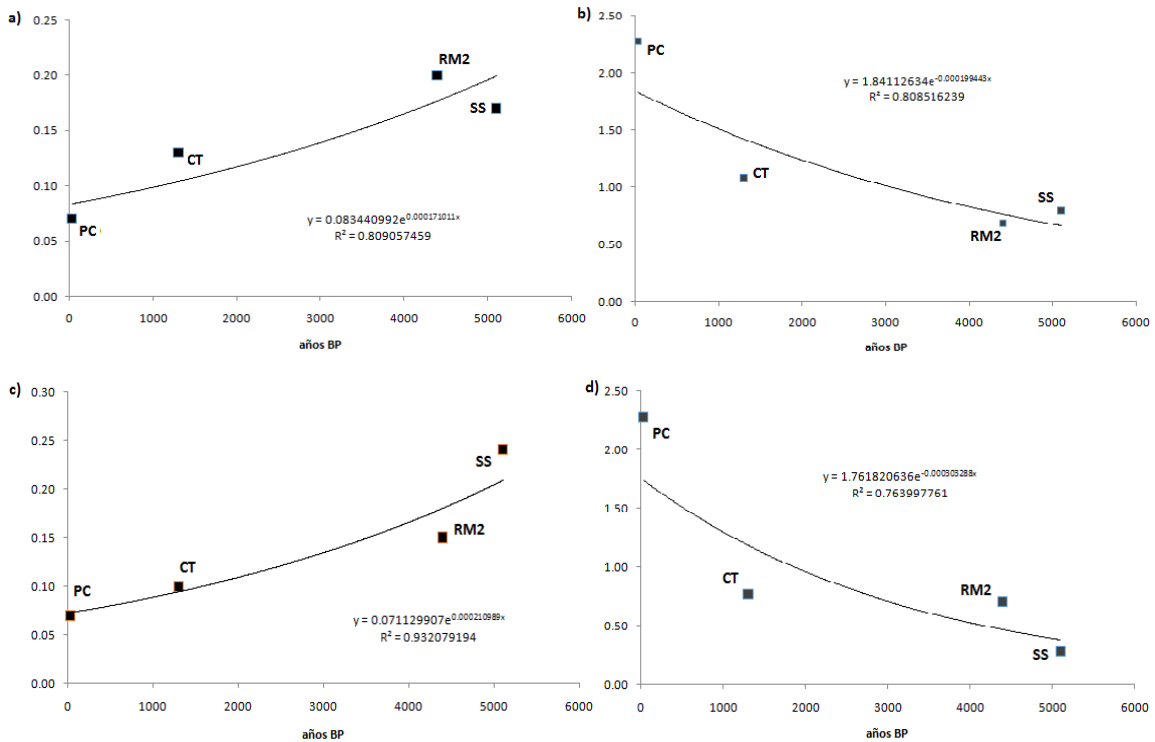
El perfil PC, como hemos venido viendo, es el parámetro inicial de pedogénesis de la cronosecuencia. Podemos decir que los óxidos de Fe que en PC se encuentran, son producto de la pura sedimentación, incluso los de CT, ya que sí se registra aporte de  $Fe_d$  mayor o igual que  $RM_2$  y SS es debido al mayor a menor aporte de la tasa de sedimentación, así, comparando Ti y  $Fe_t$  (Fe total) vemos que coinciden, pues ambas pertenecen al mismo volumen inicial del material parental (fig. 47). Esto, también lo apoya la relación  $Fe_d/Fe_t$ , de la cual hablaremos más adelante.

Sin embargo, no descartamos que haya neoformación de óxidos de Fe en CT, pero aún no es claramente detectable. Más bien, PC y CT, de acuerdo a la dependencia de frecuencias ( $X_{fd}$ ) de la susceptibilidad magnética, se comportan como capas sedimentarias. Por el contrario, la  $X_{fd}$  en  $RM_2$  y SS, muestra un desarrollo en la neoformación de Fe. En  $RM_2$ , el solum es el que se encuentra con valor de  $X_{fd}$  de entre 3 y 6%, los cuales están dentro del rango de partículas neoformadas por la pedogénesis. Pero en SS, se hace muy interesante la respuesta de la  $X_{fd}$ , ya que tiene dos fases en rango, en el solum y en la parte inferior, en donde se dan procesos de óxido-reducción. Esto nos lleva a proponer un modelo de análisis de la cronosecuencia, el cual se basa en dos sub-perfiles, el de la parte del solum y el del la parte gléyica (fig. 53). Este modelo muestra como la pedogénesis actúa desde dos frentes, de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, los cuales tienden a unirse con el tiempo para formar un perfil en donde ambos frentes interactúan dando como resultado un suelo profundo y un excelente ejemplo de la alteración completa de zona crítica por la pedogénesis.



**Figura 53. Modelo de estudio de cronosecuencia.** En la parte de arriba se ve el avance del sub-perfil oxidado de la cronosecuencia y en la parte de abajo el sub-perfil de oxidación-reducción. Se muestran las líneas de avance hasta la unión de ambos en SS.

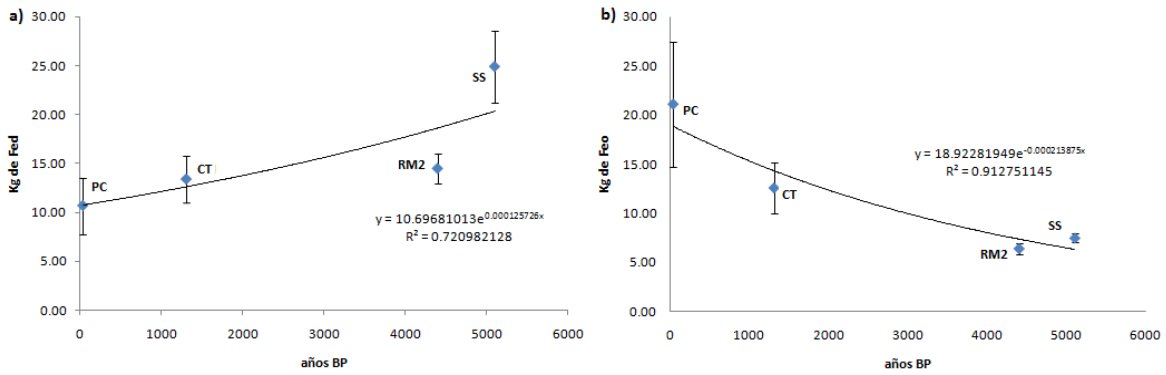
De acuerdo al modelo, analizando los dos frentes de la pedogénesis, vemos que el proceso de neoformación de Fe, en la parte oxidada y en la redox, tiene la misma tendencia a aumentar conforme al tiempo, en la cronosecuencia. Así, la cronofunción de la relación  $Fe_d/Fe_t$ , indicador de óxidos neoformados sobre el  $Fe_t$ , es positiva, en ambos sub-perfiles, comportándose de manera muy similar. Por otro lado, en ambos sub-perfiles la relación  $Fe_o/Fe_d$ , indicador de óxidos de Fe amorfos o cuasi-cristalinos sobre neoformados, se comportan similarmente aunque ahora las dos son negativas y disminuye en el tiempo (fig. 54).



**Figura 54. Comparación de las cronofunciones del comportamiento de: a)  $Fe_d/Fe_t$  y b)  $Fe_o/Fe_d$ , en el solum, y c)  $Fe_d/Fe_t$  y d)  $Fe_o/Fe_d$  de la parte óxido-reducida. Mostrando la línea de tendencia exponencial y su ecuación.**

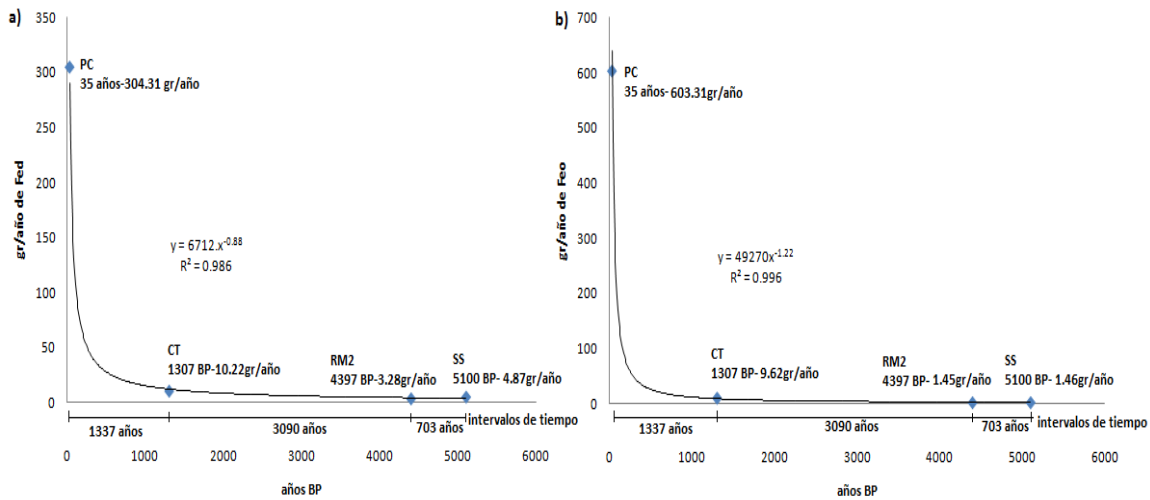
El aumento de  $Fe_d/Fe_t$  y la disminución de  $Fe_o/Fe_d$ , nos habla de un crecimiento en la neoformación de óxidos de Fe y un decrecimiento en la neoformación de óxidos de Fe amorfos, por lo que, si disminuyen los amorfos, entonces el aumento que se registra, es por los óxidos de Fe cristalinos, esto significa una pedogénesis más avanzada.

Luego, como los dos sub-perfiles se comportan de una manera similar, se analizó la cantidad en  $Kg\ m^{-2}$  de  $Fe_d$  y de  $Fe_o$  en cada perfil para corroborar la tendencia. Efectivamente existe una tendencia positiva en  $Fe_d$  y negativa en  $Fe_o$ , las cuales son inversamente proporcionales (fig. 55).



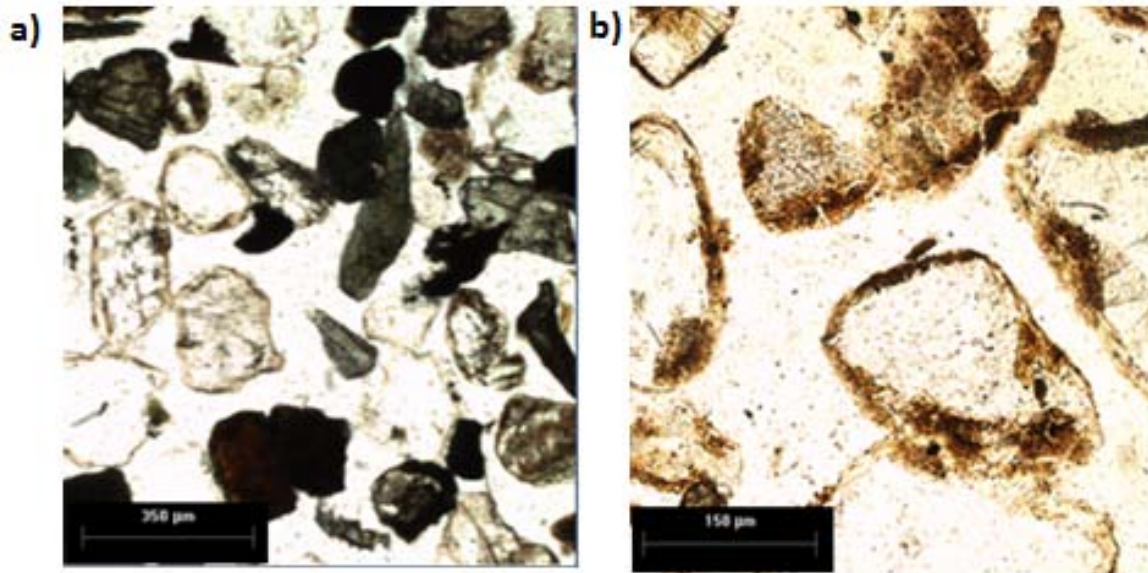
**Figura 55. Líneas de tendencia exponenciales del modelo de regresión ajustado a las cantidades de  $Fe_d$  y  $Fe_o$  en  $Kg\ m^{-2}$  en 250 cm de profundidad. Mostrando ecuaciones, coeficientes de correlación y barras de error.**

Esta acumulación se llevan a cabo primero a tasas muy rápidas en PC, pues responde al aporte de la sedimentación, para luego volverse más lentas en los demás perfiles (fig. 56). Sin embargo, también en PC, el  $Fe_o$  responde más al caso especial en el que la presencia de minerales primarios que contiene iones de  $Fe^{+2}$ , como la biotita y la magnetita, cataliza la extracción de minerales de  $Fe^{+3}$  (en este caso amorfos como la ferrihidrita), por parte del oxalato de amonio (Vodyanitskii and Shoba, 2013). De esta manera aumenta la cantidad del valor de  $Fe_o$ .



**Figura 56. Línea de tendencia potencial negativa del modelo de regresión lineal. Cronofunciones de las tasas de acumulación de  $Fe_d$  y  $Fe_o$  en gr por año. Mostrando ecuación, coeficiente de correlación e intervalos de tiempo.**

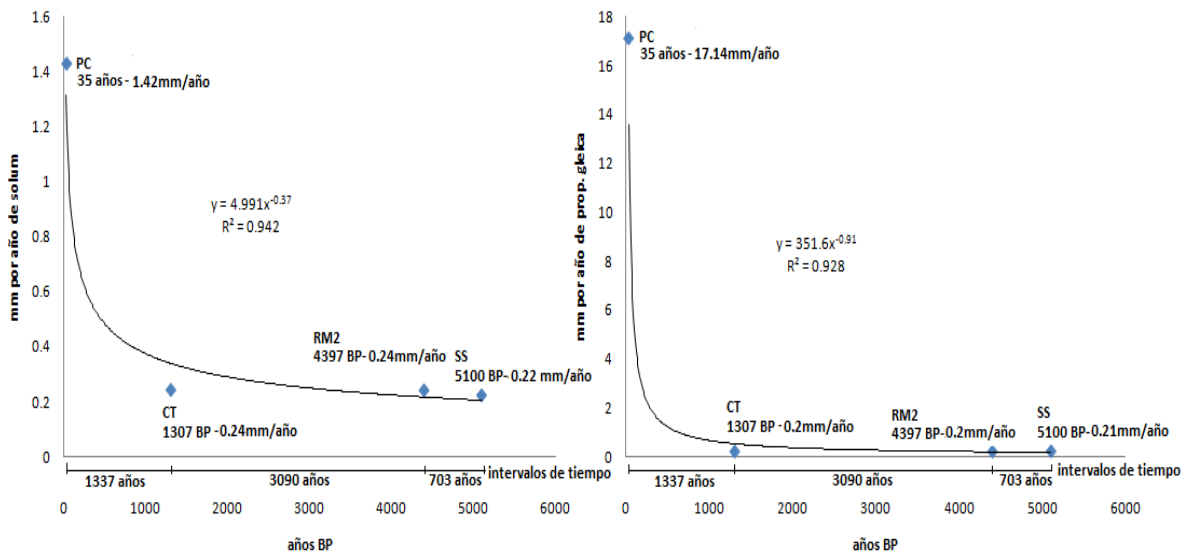
Esta tendencia de aumento en los óxidos de Fe, producto de la pedogénesis, se ve apoyada por el análisis micromorfológico, pues si examinamos PC, se ven minerales primarios pero no se encuentran rastros visibles de óxidos de Fe neoformados, por el contrario, es SS se observan recubrimientos finos de óxidos de Fe (fig. 57).



**Figura 57. Análisis micromorfológico de laminas delgadas. El a) es el horizonte AC de PC (perfil más joven), en donde no aparecen recubrimientos de óxidos de Fe. El b) se refiere al horizonte Bw<sub>1</sub> de SS (perfil más viejo), en donde se ven los óxidos de Fe finos, de color pardo amarillento, recubriendo los minerales.**

De esta manera, comparando el desarrollo y la profundidad del solum y propiedades gléyicas de los perfiles de la cronosecuencia, podemos ver las tasas de crecimiento en milímetros por año (fig. 58), que nos indican que el desarrollo de las propiedades gléyicas, es más rápido.





**Figura 58. Línea de tendencia negativa del modelo de regresión ajustado a las tasas de acumulación en el solum y propiedades gléyicas en mm por año. Mostrando ecuación, coeficiente de correlación e intervalos de tiempo.**

Esto lo podemos ver en los horizontes redox de SS, sobre todo en el horizonte BCg, en donde se registra el mayor impacto de la pedogénesis expresado en la mayor acumulación de Fe cristalino, tal vez por acción de los procesos de óxido-reducción debido a un posible fenómeno de hundimiento del terreno o aumento del acuífero por temporada húmeda, en donde el horizonte Bw<sub>2</sub> fue alcanzado por las oscilaciones del nivel freático. En dicha dinámica redox, “posiblemente” por ferrólisis, se producen más óxidos de Fe pedogénicos producto de la alteración de minerales entre los que se cuentan las arcillas, que no solo se descomponen sino dan paso a la neoformación de arcillas de mayor capacidad de expansión como las esmectitas o vermiculitas, pues en un periodo de reducción, el Fe<sup>2+</sup> libera cationes principalmente del rango de +2 y +1 como el K (potasio) de las arcillas, así como Al<sup>3+</sup>, el cual parte de éste al oxidarse en medio, precipita en hidróxido de Al interlamilar formando dichas arcillas (Schaetzl y Thompson, 2015).

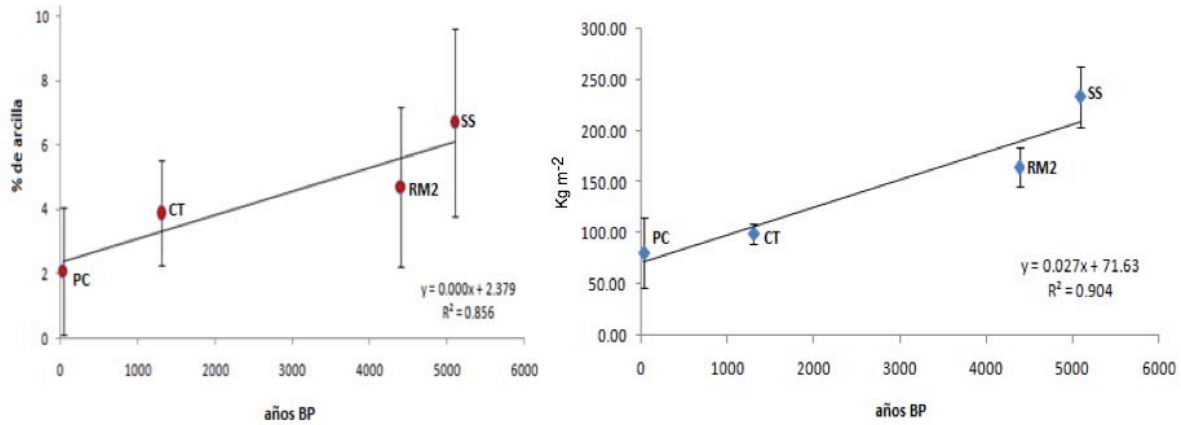
### V.2.3 Arcillas: tendencias y tipos en la cronosecuencia

Uno de los productos del intemperismo, y este como parte también de la pedogénesis, es la arcilla, la cual se produce, transporta y acumula en algunos de los horizontes del suelo como son los horizontes B. Aunque no necesariamente se produce por pedogénesis, pues puede que el material parental traiga consigo silicatos laminares secundarios provenientes de rocas sedimentarias o producto del intemperismo sobre minerales primarios (Ortega, 1981).

En el caso de esta cronosecuencia, a pesar de tener muy poca arcilla (de 0.3 a 10%) y el resto prácticamente de arena, es probable que alguna parte de ésta sea heredada del material parental. De esta manera, haciendo la suma de los Kg de arcilla de los horizontes por perfil, en PC se tienen 81.34 Kg m<sup>-2</sup> que se han acumulado en un lapso de 35 años, cantidad que es muy próxima a CT que tiene 100 Kg m<sup>-2</sup> en 1307 BP. Si lo comparamos con RM<sub>2</sub> que tiene 164.61 Kg m<sup>-2</sup> en 4397 BP, es la mitad y con SS de 233.46 Kg m<sup>-2</sup> en 5100 BP, es una tercera parte, por lo que, se pensaría que PC tiene un tiempo mayor de desarrollo, sin embargo, es un suelo con una pedogénesis apenas inicial. Entonces, esto nos hace suponer que tiene arcilla heredada.

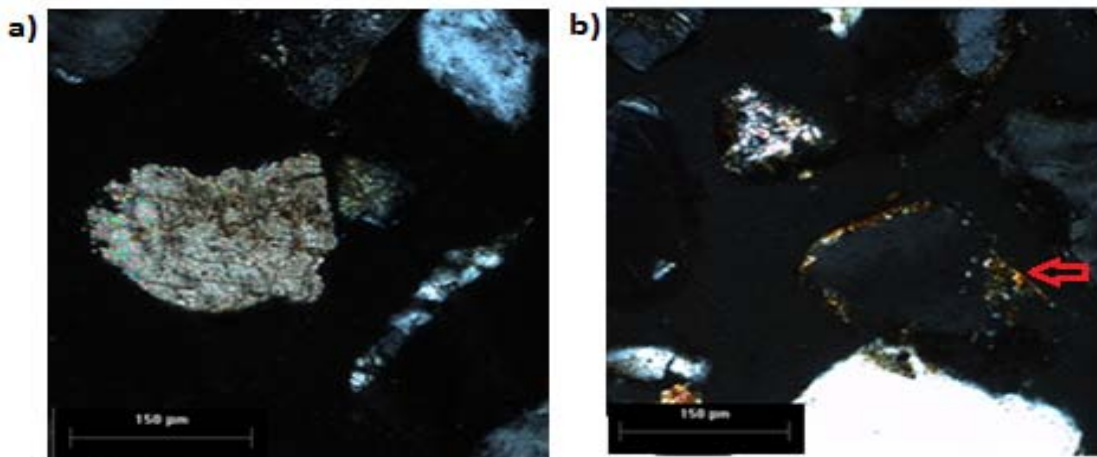
Si consideramos que la arcilla contenida en PC es la inicial, entonces la pedogénesis no empieza de cero, y más o menos los demás perfiles comenzaron con un aporte similar, que de ser cierto, depende de la homogeneidad del material parental de la cronosecuencia.

Aún sin este aporte, la pedogénesis avanza y por consecuencia la formación de arcilla autigénica. Analizando la cronofunciones de porcentaje y Kg m<sup>-2</sup> de arcilla (fig. 59) encontramos ya una clara y marcada tendencia a aumentar, con un nivel de confianza de R<sup>2</sup>=0.856 y R<sup>2</sup>=0.904 respectivamente.



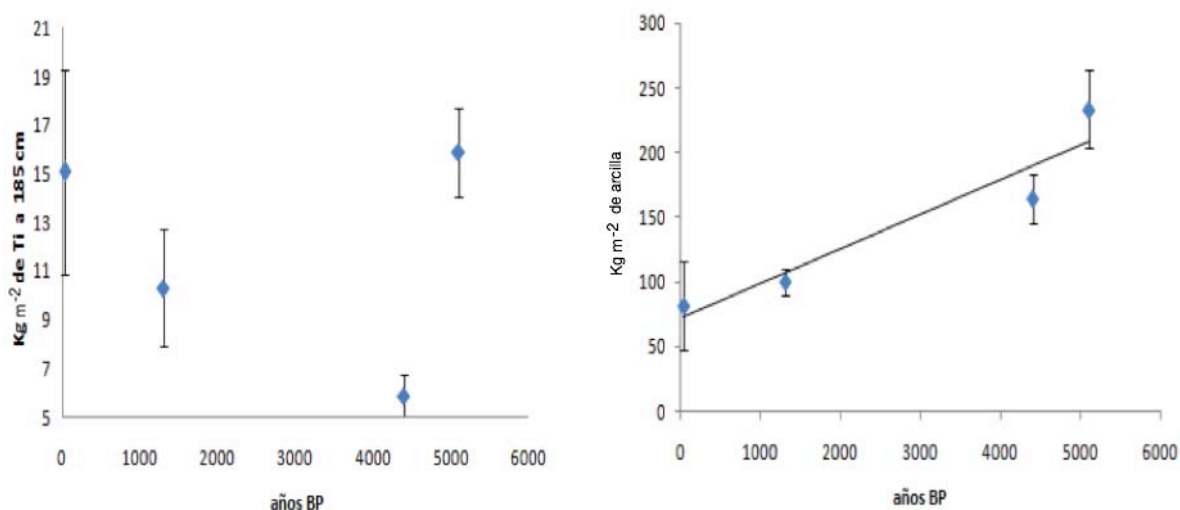
**Figura 59.** Líneas de tendencia positiva del modelo de regresión ajustadas a los datos de arcilla en la cronosecuencia. Izquierda, es en base al promedio del porcentaje de los horizontes de cada perfil. Derecha, en base a Kg m<sup>-2</sup> por perfil. Mostrando ecuaciones, coeficientes de correlación y errores de correlación.

Esta tendencia positiva de la arcilla con respecto al tiempo, claramente responde a la pedogénesis, pues considerando que conforme avanza el tiempo en la cronosecuencia los perfiles de mayor edad tiene un evidente desarrollo. Esto se refuerza al encontrar, en el análisis micromorfológico, recubrimientos de minerales arcillosos en pequeñas cantidades de un color de interferencia amarillento, que no es detectable aún en PC (fig. 60).



**Figura 60.** Análisis micromorfológico de láminas delgadas con nicoles cruzados. El a) es el horizonte AC de PC (perfil más joven), en donde no aparece inclusiones de arcilla, mostrando solo un grano de calcita. El b) se refiere al horizonte Bw<sub>1</sub> de SS (perfil más viejo), en donde la flecha indican algunos de los recubrimientos de minerales arcillosos, de un color de interferencia amarillento.

Una manera más intuitiva de suponer un avance en la pedogénesis es utilizando al Ti como indicador de volumen original del material parental (Ortega, 1981), y compararlo con la curva de tendencia de la arcilla en la cronosecuencia. Pues, la cantidad de arcilla puede depender del volumen del sedimento que formó cada cordón en distinto tiempo. Al comparar el Ti y la arcilla (fig. 61) encontramos que SS y PC tiene una cantidad parecida en Kg de Ti a 185 cm, aunque este último aún está en formación, nos hace suponer que ambos tiene un similar volumen de sedimento y por consecuente un similar aporte de arcilla inicial ( $0.81 \text{ Kg m}^{-2}$ ). Luego al ver la cantidad de arcilla en un perfil y otro, encontramos que es tres veces superior en SS. Por esta razón podemos suponer que el intemperismo pedogénico esta presente en la parte antigua de la cronosecuencia.



**Figura 61. Relación entre la cronofunción de  $\text{Kg m}^{-2}$  de Ti a 185 cm (izquierda), como indicador de volumen original del material parental (Ortega, 1981) y la línea de tendencia de la arcilla (derecha), como herramienta para intuir la formación de arcilla pedogenética de la arcilla inicial propia de los procesos sedimentarios. Mostrando barra de error.**

De acuerdo a los resultados de concentración total de K en las muestras totales, se ve primero un claro aumento y después un descenso en la cronosecuencia, formando una parábola que alcanza su máximo entre los perfiles CT y RM<sub>2</sub> (fig. 62). Se pensó en un principio relacionar el tipo de arcilla y la cantidad presente de K por perfil, para poder así determinar la formación de vermiculita y esmectita a partir de las micas (illita) (Ortega, 1981), sin embargo para esto sería necesario hacer una cuantificación exacta

de la cantidades de tipos de arcillas, cosa que resulta algo difícil al tener tan poca arcilla. Pero por otro lado, el comparar los tipos de arcilla con el comportamiento parabólico del potasio, podemos proponer lo siguiente: primero, puede que sí se esté dando una pérdida de K pero no nos atrevemos a afirmarlo, no obstante la mayor parte de arcillas a sido heredada, pues los contenidos en tipos (fases) son muy parecidos en todos los perfiles; segundo, lo que nos pasa a suponer que esta pérdida de K sí se está dando en suelo más antiguos, como los de las terrazas plio-cuaternarias y miocénicas de Ortíz-Pérez, *et al*, 2005, de los cuales la dinámica fluvial ha transportado y heredado a nuestros suelos; y tercero, claramente vemos la diferencia que existe entre la pedogénesis dada por los procesos redox y los de solo oxidación (en el solum), pues siguiendo el modelo propuesto (ver los procesos de la cronosecuencia de la figura 53), vemos que el solum, en escala de tiempo no mayor a 5100 BP, puede o no estar produciendo arcillas pedogenéticas como vermiculita, en cambio la parte redox parece ser que sí esta produciendo esmectitas, en el perfil SS. De esta manera, nos atrevemos a decir que las variaciones dadas en el nivel freático afectan de una manera importante la pedogénesis.

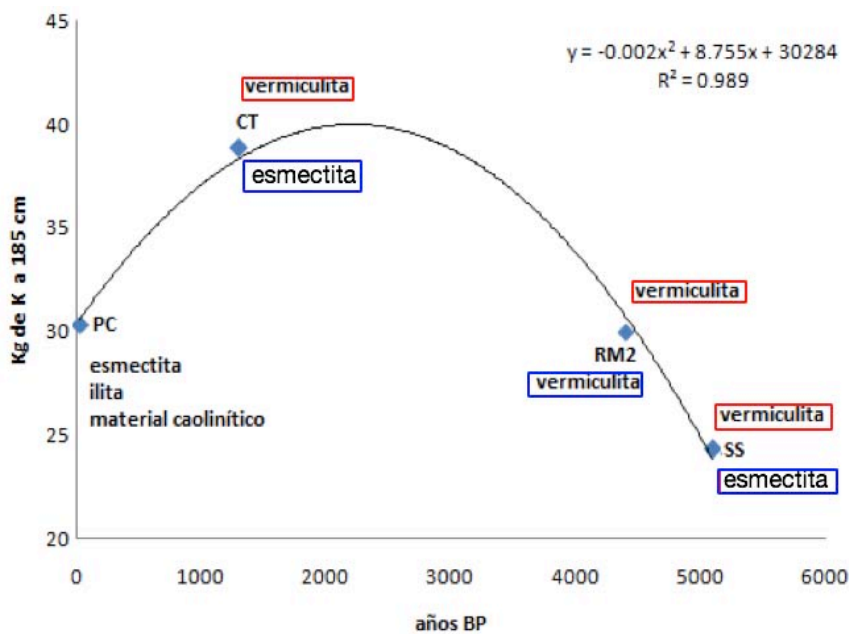
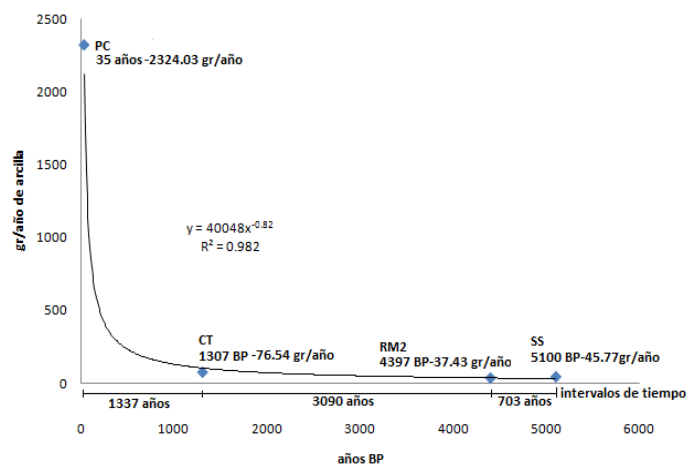


Figura 62. Líneas de tendencia polinómica ( ya que es la de mejor ajuste en este caso) del modelo de regresión. Relación entre arcillas del solum (en rojo) y redox (en azul)de cada perfil y la tendencia del K. Mostrando ecuación y coeficiente de correlación.

Por último, la tasa de acumulación de arcilla (fig. 63), es muy rápida en los primeros 35 años, pues PC está apenas en formación y tiene la influencia directa del aporte sedimentario, pero en los siguientes 1337 años baja de 2324.03 gr/año a 76.54 gr/año en CT, posteriormente, en RM<sub>2</sub> y SS se hace aún más lenta con 37.43 y 45.77 gr/año respectivamente. Entonces, la tasa de PC responde a la sedimentación y la de los demás perfiles a la pedogénesis.

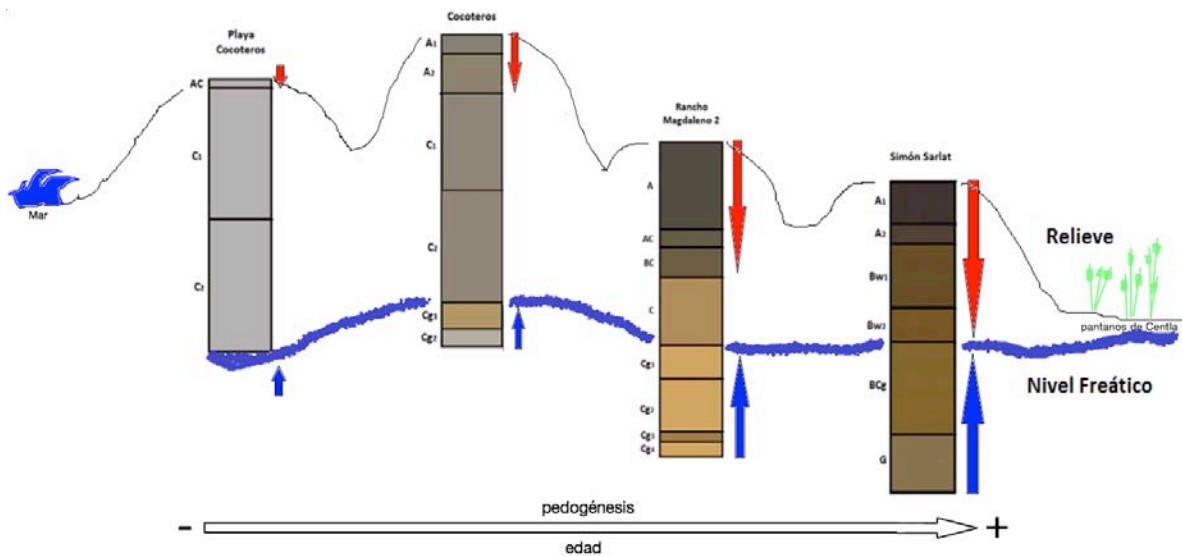


**Figura 63. Línea de tendencia potencial negativa del modelo de regresión ajustado a la tasa de acumulación de arcilla por año. Mostrando ecuación, coeficiente de correlación e intervalos de tiempo.**

Es claro que la tendencia de la neoformación de arcillas es positiva, sin embargo, aun se encuentra en desarrollo muy temprano.

#### **V.2.4 Modelo propuesto de suelos en cordones litorales de Tabasco.**

De acuerdo a la información concentrada en los resultados y su análisis en la discusión, proponemos el siguiente modelo (fig. 64), en el que se explica la dinámica de avance de la pedogénesis a través del tiempo. De acuerdo al modelo, la pedogénesis aumenta conforme la edad de los cordones, y lo hace de dos frentes: de manera descendente en el solum y de forma ascendente por procesos redox.



**Figura 64. Modelo propuesto de evolución de los suelos en los cordones litorales de Tabasco. En éste se dibuja el avance de la pedogénesis tanto en la cronosecuencia como en cada perfil, siendo esto último indicado por las flechas rojas (pedogénesis en el solum) y flechas azules (pedogénesis en la parte afectada por cambios en el potencial redox).**

Una vez presentados, analizados y discutidos los resultados obtenidos, se llega por necesidad e inducción a una pregunta esencial para esta tesis: ¿se puede plantear verdaderamente una cronosecuencia de suelos en este geosistema de cordones litorales de la planicie costera de Tabasco?

Dicha pregunta implica medir los factores formadores de nuestra cronosecuencia, ante el concepto ideal de una cronosecuencia y sus factores formadores. Sin embargo, una cronosecuencia completamente ideal no va a existir, pues el devenir de las estructuras espacio temporales es dinámico, esto es que, la realidad es dinámica.

Por este motivo, no podemos ser muy estrictos, en establecer que los factores formadores de nuestra cronosecuencias sean inmutables y siempre constantes, sino que dentro de la misma cronosecuencia hay variaciones en sus factores formadores, por lo que nos atrevemos a proponer un concepto que se ajusta a la descripción de las variaciones en los factores formadores de los suelos de las cronosecuencias: cronosecuencia de suelos con factores formadores sinérgicos (CSFFS).

## CAPÍTULO VI

### Conclusiones

1. De acuerdo con los resultados de Ti/Zr como indicador de discontinuidad, al Ti como indicador de volumen original y a la superposición de los difractogramas en muestra total, se pudo establecer una homogeneidad relativa en el material parental de la cronosecuencia, a pesar de una leve discontinuidad entre PC y SS, que si atendemos a CSFFS (cronosecuencia de suelos con factores formadores sinérgicos), podemos establecerla.

2. La tendencia en de la materia orgánica (MO) en la cronosecuencia es a aumentar con el tiempo, y no solo en acumulación, como lo demuestran los % y  $\text{Kg m}^{-2}$ , sino en humificación, lo cual se demostró en láminas delgadas y por el color de los horizontes A. A pesar de que el proceso de acumulación de materia orgánica es relativamente rápido, en esta cronosecuencia no se ha dado de la manera esperada a la temporalidad que es 5100 BP, por lo que proponemos que por una parte se debe a la larga ocupación de la zona por pueblos prehispánicos casi desde el inicio de la temporalidad de nuestra cronosecuencia, por lo que las constantes alteraciones antrópicas no permitieron la acumulación de MO en el suelo.

3. Los óxidos de Fe pedogénicos tienden a aumentar dentro de la cronosecuencia; además la producción y acumulación pedogénica de Fe cristalino (en % y  $\text{kg m}^{-2}$ ) aumenta con el tiempo, por consecuencia el Fe amorfo disminuye, planteando así un avance el la pedogénesis.

Pero analizando este sentido positivo de la pedogénesis, vemos que PC y CT se comportan más bien como capas sedimentarias, por el contrario RM2 y SS ya tienen neoformación de óxidos de Fe. RM2 lo presenta en el solum; SS en el solum y en la parte del subsuelo afectada por procesos redox, en donde es más fuerte la



pedogénesis. De esta manera, se proponen dos frentes de pedogénesis: una de la superficie hacia la profundidad representada en el solum, y otra del contacto con el nivel freático hacia la superficie. Ambos frentes al final logran juntarse y afectan a todo el perfil desde el nivel freático a la superficie. Por otro lado, tal vez, la razón por la cual en el perfil Simón Sarlat el nivel freático esté más cerca de la superficie es por un posible hundimiento del terreno.

4. Los filosilicatos pedogénicos aumentan con el tiempo. Sin embargo, no es posible diferenciar la arcilla neoformada in situ de la heredada por el material parental. Por lo que gracias a la comparación del Ti como indicador de volumen original y la tendencia de la arcilla en la cronosecuencia, podemos saber que sí PC y SS, siendo el primero el más joven y el segundo el de mayor antigüedad, tienen mas o menos la misma cantidad de volumen original por lo cual suponemos un posible igual aporte de arcilla heredada, luego vemos que SS tiene una mayor cantidad de arcilla, que posiblemente sea por pedogénesis.

Todo lo anterior nos permite considerar al perfil PC como el modelo de inicio de pedogénesis, esto en cuanto a que el sedimento hereda cierta cantidad de materia orgánica, óxidos de Fe y arcilla, con la que comenzaron los demás perfiles de la cronosecuencia, siendo una herencia del sedimento que formó los cordones. Así, PC es el punto de partida de la pedogénesis, pues la tasa de acumulación de los diferentes materiales pedogénicos ex situ, es muy alta, lo que significa un aporte heredado ya que en los demás perfiles disminuye radicalmente.

De esta manera, además del tiempo, la lejanía del mar da a los perfiles mayor estabilidad, por lo tanto una fase propicia para la formación de suelo.

Finalmente, la cronosecuencia se encuentra en una etapa muy temprana de su desarrollo y evolución, pues comparada con otros suelos desarrollados en condiciones similares vemos que 5000 años son muy pocos para poder ver un equilibrio dinámico que comenzaría por lo menos a 1 millón de años.

## Bibliografía

- Abad Isabel. 2006. Physical meaning and applications of the illite Kübler index: measuring reaction progress in low-grade metamorphism. Departamento de Geología. Universidad de Jaén. 23071 Jaén. Spain. Pps. 53-64.
- Aguayo J. E., Gutiérrez-Estrada M. A., Araujo Mendieta J., Sandoval-Ochoa J. H., Vázquez-Gutiérrez F. 1999. Geodinámica Holocénica y reciente del sistema fluviodeltáico Grijalva-Usumacinta, suroeste del Golfo de México. Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural 49:29-44.
- Arnold R.W., Szabolcs V., Targulian V.O. 1990. Global Soil Change. International Institute for Applied System Analysis. A-2361. Laxenburg, Austria. CP-90-2. Edited and Printed in Budapest, pps. 108.
- Barceinas-Cruz, Hermenegildo, 2015. Uso de propiedades magnéticas en suelos como indicadores paleo-ambientales y de actividades humanas antiguas. Tesis maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM.
- Birkeland P. W. 1984. Soils and Geomorphology. Oxford Univ. Press, NY.
- Bockheim J.G., Gennadiyev A.N., Hammer R.D., Tandarich J.P. 2004. Historical development of key concepts in pedology. Geoderma 124 (2005) 23-36.
- Brewer R., Sleeman J.R., 1988. Soil Structure and Fabric. CSIRO Publishing, 173 pp.
- Bullock P., Fedoroff N., Jongerius A., Stoops G., Tursina T., Babel U., 1985. Handbook for soil thin section description. Wolverhampton, U.K., Waine Research Publications.

- Calero G.J.A. 2005. Génesis de la Fracción Mineral y de la Ultramicrofábrica en una Cronosecuencia de Suelos sobre Terrazas el Río Guadalquivir (Tesis Doctoral). Universidad de Granada. Pags. 743.
- Dearing J. A. K. L., Hay S. M. J. B., Huddleston A. S., Wellington E. L. H., and Loveland P. J. 1996. Magnetic susceptibility of soil: An evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophysical Journal International*, 127:728– 738.
- Enriqueta Gracia. 1986. Apuntes de Climatología. Según el programa vigente en las carreras de Biólogos U.N.A.M., de la F.E.S. de Cuahutitlán, U.N.A.M. y de la UAM. México D.F. pps. 155.
- Pfeiffer M., Aburto F., Le Roux J.P., Kemnitz H., Sedov S., Solleiro-Rebolledo E., Seguel O. 2012. Development of a Pleistocene calcrete over a sequence of marine terraces at Tongoy (north-central Chile) and its paleoenvironmental implications. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile/Centro de Excelencia en Geotermia Andina, Plaza Ercilla 803, 8370450 Santiago, Chile.
- FAO-UNESCO, 1994. World Reference Base for Soil Resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, pps. 161.
- González O., Millan Z., Bezada M. 2008. Pedogénesis de una cronosecuencia de suelos en la región de Yaritagua y Guama, estado Yaracuy-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 49(2), pp. 223-245.
- Gutiérrez Elorza M. 2008. Geomorfología. Ed. Pearson Educación, S. A., Madrid. ISBN: 978-84-8322-389-5, pps. 920.
- Huggett R.j. 1998. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena* 32, pp. 155–172.

INEGI.2005.Prontuario de información municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Centla, Tabasco. Clave geoestadística 27003.

International Soil Reference and information Centre (ISRIC). 2002. Procedures of soil analysis. Compiled and Edited by Van Reeuwijk. Ed. 6. ISSN 0923-3792: no. 9.

Jackson M. L., Whiting L. D., Pennington R. P. 1949. Segregation procedure for the mineralogical analysis of soils. Soil Science Society Proceeding. P. 77-81.

Jenny H. 1941. Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. New York. Ed. McGraw-Hill. Foreword by Ronald Amundson, 1994, in the University of California, Berkeley.

Li D., Yang Y., Guo J., Velde B., Zhang G., Hu F., Zhao M. 2011. Evolution and significance of soil magnetism of basalt-derived chronosequence soils in tropical southern China. Agricultural Sciences. Vol.2, No.4. pps. 536-543. doi:10.4236/as.2011.24070

Márquez García A. Z. 2011. Procesos de erosión y depositación en el litoral sur del golfo de México (Tesis Doctoral). Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. México, D.F. pps. 185.

Mehra O. P., Jackson M. L. 1960. Iron oxide removal from soil and clays by a dothionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate buffer. Clays and Clay Miner. 7. 317-327.

Muhs Daniel R. 2001. Evolution of Soils on Quaternary Reef Terraces of Barbados, West Indies. Quaternary Research, 56. Pps. 66-78. doi:10.1006/qres.2001.2237, available online at <http://www.idealibrary.com>

Munsell Soils Color, Charts, 1975. Macbeth División of Kollmorgen Corporation  
Baltimore, Maryland.

Nooren Kees, Wim Z. Hoek, Hans van der Plicht, Remke L. Van Dam, Maarten Prins,  
Tim Winkels, Hans Middelkoop. 2014. Reconstruction of Maya induced soil  
erosion during the Pre-Classic and Classic period from world's largest beach  
ridge plain (poster). Universiteit Utrecht, Faculty of Geosciences.  
[c.a.m.nooren@uu.nl](mailto:c.a.m.nooren@uu.nl).

Padilla R. J., Sánchez. 2007. Evolución geológica del sureste mexicano desde el  
Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. UNAM,  
Facultad de Ingeniería, División Ciencias de la Tierra. Boletín de la Sociedad  
Geológica Mexicana. México D. F. Tomo LIX, núm. 1. P. 19-42.

Phillips J.D. 1993. Progressive and Regressive Pedogenesis and Complex Soil Evolution.  
Quaternary Research 40, pp. 169-176.

Phillips J.D., 2000. Signatures of divergence and self-organization in soils and  
weathering profiles. J. Geol. 108, 91- 102.

Psuty N. P. 1965. Beach-ridge development in Tabasco, Mexico. Annals of the  
Association of American Geography 55: 112-124.

Sauer D., Finke P., Sørensen R., Sperstad R., Schüllli-Maurer I., Høeg H., Stahr K. 2012.  
Testing a soil development model against southern Norway soil  
chronosequences. Quaternary International, 265. Pps. 18-31. homepage:  
[www.elsevier.com/locate/quaint](http://www.elsevier.com/locate/quaint)

Sauer D., Schüllli-Maurer I., Sperstad R., Sorensen R., Stahr K. 2008. Podzol  
development with time in sandy beach deposits in southern Norway. J. Plant  
Nutr. Soil Sci. 171, pps. 483-497. DOI: 10.1002/jpln.200700023

- Sauer D., Wagner S., Brückner H., Scarciglia S., Mastronuzzi G., Stahr K. 2010. Soil development on marine terraces near Metaponto (Gulf of Taranto, southern Italy). *Quaternary International*, 222. Pps. 8–63.
- Scarciglia F., Pulice I., Robustelli G., Vecchio G. 2006. Soil chronosequences on Quaternary marine terraces along the northwestern coast of Calabria (Southern Italy). *Quaternary International*, 156 –157. Pps.133–155.
- Schaetzl R.J., Thompson M.L. 2015. *Soils: genesis and geomorphology*. Cambridge University press. Second edition. Pp. 777.
- Solís Castillo B. 2014. Impacto natural y cultural de las secuencias edafosedimentarias del Holoceno en la región suroriental de México: Un estudio geoarqueológico en las Tierras Bajas Mayas (Tesis doctoral). UNAM, Posgrado en Ciencias de la Tierra. México D.F. pps. 69.
- Stevens P.R., Walker T.W. 1970. The Chronosequence Concept and Soil Formation. *The Quarterly Review of Biology*. Vol. 45. No. 4. Pp. 333-350. On line: <http://www.jstor.org/stable/2821008>
- Targulian V.O., Krasilnikov P.V. 2007. Soil system and pedogenic processes: Self organization, time scale, and enviromental significance. *Catena*, doi: 10.1016/j.catena.2007.03.007
- Targulian V.O., Goryachkin S. V. 2004. Soil memory: Types of record, carriers, hierarchy and diversity. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 21, núm. 1, p. 1-8.

- Tsai C.C., Chen Z.S., Kao C.I., Ottner F., Kao S.J., Zehetner F. 2010. Pedogenic development of volcanic ash soils along a climosequence in Northern Taiwan. *Geoderma*, 156 . pps. 48–59. [www.elsevier.com/locate/geoderma](http://www.elsevier.com/locate/geoderma)
- Velázquez Villegas G. 1994. Los recursos hidráulicos del estado de Tabasco: ensayo monográfico. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Centro de Investigaciones de la División Académica de Ingeniería y Tecnología, Unidad Chontalpa. Villahermosa, Tabasco, México. Pps. 242.
- Vidic N.j. 1998. Soil-age relationships and correlations: comparison of chronosequences in the Ljubljana Basin, Slovenia and USA. *Catena*, 34. Pps. 113–129.
- Worm Horst-Ulrich. 1998. On the sueroaramagnetic-stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility. *Geophys. j. Int.* 133. Pps. 201-206.
- WRB, 1998. World Reference Base for Soil Reosources. World Soil Resources Reports 84. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Yaalon D.H. 1975. Conceptual Models in Pedogenesis: can Soil-forming Functions be solved? *Geoderma*, 14, pps. 189-205.
- Zhang Gan-Lin., Pan Ji-Hua., Huang Cheng-Min., Gong Zi-Tong. 2007. Geochemical features of a soil chronosequence developed on basalt in Hainan Island, China. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. v. 24, núm. 2. Pps. 261-269.

## Anexo

Tabla 11. Valores de susceptibilidad magnética Xlf y Dependencia de frecuencia Xfd.

Perfil	Profundidad (cm)	Xlf 10 <sup>-6</sup> (m <sup>3</sup> /Kg)	Xfd (%)
<b>Playa Cocoteros</b>	0	0.46	1.12
	10	0.23	0.58
	20	0.08	0.00
	30	0.35	0.00
	40	0.20	0.00
	50	0.12	1.08
	60	0.13	1.49
	70	0.25	0.00
	80	0.21	0.00
	90	0.23	0.00
	100	0.37	0.65
	110	0.63	0.73
	120	0.41	0.00
	130	0.18	1.06
	140	0.83	0.45
	150	0.43	0.29
	160	0.43	0.00
	170	0.49	0.62
	180	0.24	0.00
190	0.12	0.51	
<b>Cocoteros</b>	0	0.16	0.00
	10	0.15	0.88
	20	0.10	0.68



	30	0.11	0.00
	40	0.11	1.15
	50	0.06	1.09
	60	0.06	0.00
	70	0.06	0.00
	80	0.12	0.00
	90	0.06	0.00
	100	0.07	0.00
	110	0.40	0.97
	120	0.11	0.58
	130	0.16	0.40
	140	0.16	0.00
	150	0.39	0.49
	160	0.11	0.00
	170	0.15	0.41
	180	0.10	0.00
	190	0.12	1.10
	200	0.08	0.82
	210	0.03	0.00
	220	0.04	0.00
<b>Rancho Magdalena 2</b>	0	0.06	1.28
	10	0.06	3.80
	20	0.06	4.65
	30	0.06	4.94
	40	0.05	6.06
	50	0.05	5.97
	60	0.04	1.72
	70	0.03	0.00

	80	0.03	2.17
	90	0.02	6.45
	100	0.01	0.45
	110	0.02	0.36
	120	0.01	0.00
	130	0.01	0.00
	140	0.01	0.00
	150	0.01	0.00
	160	0.01	0.98
	170	0.03	0.00
	180	0.01	0.00
	190	0.01	0.00
	200	0.02	1.23
	210	0.02	0.00
	220	0.03	0.00
	230	1.05	0.43
<b>Simón Sarlat</b>	0	0.11	0.00
	10	0.13	1.24
	20	0.09	2.56
	30	0.06	2.20
	40	0.05	5.48
	50	0.03	2.08
	60	0.02	5.71
	70	0.03	1.92
	80	0.04	4.69
	90	0.03	2.44
	100	0.03	0.00
	110	0.03	0.00

120	0.03	0.00
130	0.03	0.00
140	0.03	4.88
150	0.02	3.13
160	0.02	0.00
170	0.02	0.44
180	0.03	2.63
190	0.02	5.71
200	0.01	0.00
210	0.04	0.00
220	0.14	0.54

Tabla 12. Valores de densidad aparente, límite inferior y espesor de horizonte, para determinar Fed-Feo-Fet-arcilla y materia orgánica de mg/g a Kg m<sup>-2</sup>.

clave	horizonte			Fed		Feo		Fet		MO		arcilla	
	da=mm/v	límite inferior (cm)	espesor	mg/g	Kg m <sup>-2</sup>	mg/g	Kg m <sup>-2</sup>	mg/g	Kg m <sup>-2</sup>	mg	Kg m <sup>-2</sup>	mg	Kg m <sup>-2</sup>
SS-A1	1.36	30	30	6.15	2.51	3.40	1.39	50.4	20.60	44.5	18.18	70.22	28.69
SS-A2	1.49	45	15	4.24	0.95	3.36	0.75	49.2	10.98	30	6.69	50.43	11.25
SS-Bw1	1.50	90	45	7.20	4.86	2.66	1.79	42	28.35			51.55	34.80
SS-Bw2	1.58	115	25	6.66	2.63	2.67	1.06	55.8	22.05			111.67	44.12
SS-BCg	1.53	185	70	10.48	11.24	1.58	1.69	43.5	46.66			88.61	95.05
SS-G	1.53	225	40	4.38	2.67	1.27	0.77	28.8	17.59			32.01	19.55
total					24.87		7.45		146.22		24.88		233.46
desvest					3.69		0.45		12.31		8.12		29.80
RM2-A	1.46	70	70	4.72	4.83	1.69	1.73	23.9	24.45	27.5	28.13	56.41	57.71
RM2-AC	1.44	80	10	3.69	0.53	2.51	0.36	28.5	4.12	21.5	3.10	43.45	6.27
RM2-BC	1.47	107	27	4.00	1.58	1.83	0.73	30.8	12.20			4.32	1.71
RM2-C	1.50	160	53	4.00	3.17	1.75	1.38	26.5	21.02			35.30	28.00
RM2-Cg1	1.46	187	27	3.40	1.34	1.10	0.43	22.2	8.73			86.76	34.11
RM2-Cg2	1.47	231	44	2.82	1.82	2.00	1.29	34.7	22.41			31.56	20.38
RM2-Cg3	1.55	237	6	6.06	0.56	3.09	0.29	77.1	7.18			65.17	6.07
RM2Cg4	1.44	250	13	3.25	0.61	0.89	0.17	26.7	4.99			55.44	10.35
total					14.45		6.38		105.08		31.24		164.61
desvest					1.51		0.59		8.28		17.70		18.87
C-A1	1.44	10	10	4.03	0.58	3.10	0.45	30	4.33	24.5	3.54	30.09	4.35
C-A2	1.53	32	22	3.22	1.09	2.51	0.85	40	13.50	10.5	3.54	56.19	18.97
C-C	1.54	110	78	3.21	3.85	2.81	3.37	30	36.01			23.62	28.36
C-C1	1.60	195	85	4.68	6.35	5.05	6.85	50	67.86			19.70	26.73
C-Cg1	1.56	212	17	3.95	1.05	3.03	0.81	40	10.62			51.86	13.77
C-Cg2	1.54	222	10	2.84	0.44	1.68	0.26	30	4.63			51.01	7.87
total					13.36		12.5		136.96		7.08		100.04
desvest					2.38		2.59		24.94		0.00		9.81
PC-AC	1.59	5	5	3.99	0.32	9.11	0.72	56.3	4.47	8.5	0.67	9.97	0.79
PC-C	1.56	100	95	2.97	4.41	4.68	6.94	40.2	59.66			10.01	14.86
PC-C2	1.65	190	90	4.00	5.93	9.08	13.4	61.2	90.69			44.33	65.69
total					10.65		21.1		154.82		0.67		81.34
desvest					2.90		6.36		43.67		0.00		34.14