

00387



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACIÓN MOLECULAR DE LÍPIDOS EN SUELOS Y
SU RELACIÓN CON CULTIVOS DE IMPORTANCIA
AGRÍCOLA EN MÉXICO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
DOCTORA EN CIENCIAS (BIOLOGÍA)
P R E S E N T A
ITALIA MERCADO SOTELO

DIRECTORA DE TESIS: DRA. NORMA EUGENIA GARCÍA CALDERÓN

MEXICO, D. F.

ABRIL, 2005

M343183



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

A Ricardo y Rodrigo por su amor incondicional y por sus sonrisas que logran inspirarme día a día.

A Abel con mucho amor y cariño, y que maravilloso andar por el mismo camino, sin olvidar nuestras propias metas.

A mis padres Everardo y Ernestina quienes me enseñaron que el valor y el amor son la combinación perfecta para hacer realidad nuestros sueños.

A mis queridos hermanos Héctor, Rocío, Ángeles, Marina y Ernestina, con quienes he podido compartir vivencias y sentimientos únicos.

A mis sobrinos Nahalleli, Shantal, Héctor, Efraín y Jhoana por su cariño de siempre.

A mis amigos, y que bueno poder coincidir en el espacio y en el tiempo: Juan Solís, Efraín Suárez, Rafael Trejo, César Meza, Luz Velasco, Trinidad Verdejo, Laura Reyes, Elizabeth Fuentes, Gabriela Castaño, Cristina Cramer, Carmen Letechipia, Guadalupe López, L.M. Dáng, Rosalía Ramos, Consuelo González, María del Socorro Galicia, Guadalupe Cárdenas, Sara Solís, Soledad Medina, Juan Manuel López.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.
NOMBRE: Merced Solís Italia
FECHA: 12/04/05
FIRMA: Itala Mercado

Agradecimientos:

Un especial agradecimiento a nuestros entrañables e inolvidables maestros M. en C. Nicolás Aguilera Herrera y M. en C. Alfredo Echegaray Alemán, gracias maestros.

A la Dra. Norma Eugenia García Calderón, por su confianza y comentarios siempre valiosos en el desarrollo de esta investigación y durante mi formación académica, además por su amistad que me ha brindado en todo este tiempo.

Al Dr. Francisco Martín Martínez, quien logró motivarme en esta área, pero principalmente por enseñarme que nuestras capacidades aumentan con la dedicación y la constancia.

A la Dra. Cristina Pérez Amador Barrón, por sus enseñanzas durante mi estancia en la Facultad de Ciencias y por sus valiosos comentarios.

A la Dra. Christine Desiree Siebe Grabach por sus observaciones importantes y enriquecedoras en este manuscrito.

Al Dr. Gonzalo Almendros Martín, por todas sus enseñanzas y comentarios siempre tan acertados, y por su disponibilidad durante el desarrollo de la tesis.

Al Dr. Gilberto Hernández Silva, por sus valiosas aportaciones a esta investigación y por su importante apoyo en esta nueva etapa.

A la Dra. Teresa de Jesús Reyna Trujillo por su disponibilidad en la revisión y por sus comentarios que me acompañarán por siempre.

Al Dr. José Luis Mudarra Gómez, por su hospitalidad en la Ciudad de Sevilla y por su asesoría en el área de Clasificación de Suelos.

Al Dr. José Luis Pérez Rodríguez del Centro de Materiales-CSIC, por su amabilidad y apoyo en la Difracción de Raxos X.

A la técnico Trinidad Verdejo, por su apoyo en el Laboratorio de Biogeoquímica, IRNAS-CSIC

A la M. en C. Norma Fernández, Instituto de Geología, UNAM, por su asesoría en los análisis estadísticos

Agradezco a las siguientes instituciones por haberme apoyado decisivamente durante la realización de la Tesis Doctoral: CONACYT, UNAM y el IRNAS-CSIC.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN 1

II. REVISIÓN DE LITERATURA 4

1. Lípidos en el suelo 4
 - 1.1 Principales grupos 4
 - 1.2 Lípidos como biomarcadores 13
2. Dinámica de los lípidos en el suelo 17
 - 2.1 Origen y distribución 17
 - 2.2 Factores que influyen en su composición 20
3. Importancia de los lípidos en el suelo 21
4. Lípidos ligados a la fracción órgano-mineral 24
5. Metodologías de extracción de lípidos 27

III. OBJETIVOS 33

IV. MATERIALES Y METODO 34

1. Campo 34
2. Tratamiento de las muestras en el Laboratorio 38
 - 2.1 Suelos 39
 - a. Análisis físicos 39
 - b. Análisis químicos 39
 - 2.2 Lípidos 40
 - a. Extracción de lípidos 40
 - Equipo soxhlet 40
 - Extracción con fluidos supercríticos 41
 - b. Técnicas en la identificación de lípidos 44
 - Cromatografía de gases 44
 - Cromatografía de gases/Espectrometría de masas 44
 - 2.3 Fraccionamiento del suelo 48
 - a. Fracción orgánica de ácidos húmicos 48
 - b. Fracción mineral 49
3. Análisis estadístico 50

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 52

- 1. El extracto lipídico del suelo y su distribución con la profundidad del suelo 52
 - 1.1 Sistema chinampero 53
 - 1.2 Suelos con desarrollo genético 61
- 2. Identificación de los extractos lipídicos 94
- 3. Extracción de lípidos con fluidos supercríticos 117
- 4. Los lípidos y su relación con la fracción órgano-mineral 127

VI. CONCLUSIONES 151

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 155

- APÉNDICE I 172**
- APÉNDICE II 190**
- APÉNDICE III 197**

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de lípidos (Battaner, 1993).	5
Tabla 2. Características de Fluidos Supercríticos representativos (De: Hawthorne, 1990).	31
Tabla 3. Descripción de los factores formadores de suelo en los sitios de muestreo.	35
Tabla 4. Condiciones de trabajo con CO ₂ supercrítico.	42
Tabla 5. Parámetros del Cromatógrafo de Gases.	47
Tabla 6. Clasificación taxonómica de los suelos estudiados, bajo diferentes cultivos agrícolas con base a las claves de Soil Taxonomy (1999).	53
Tabla 7. Resultados de los análisis físicos y químicos de la Calicata 1, en San Luis Tlaxialtemalco, Xochimilco, cultivada con <i>Zea mays</i> , L.	54
Tabla 8. Resultados de los análisis físicos y químicos de la Calicata 2, en San Andrés Mixquic, Tláhuac, cultivada con <i>Brassica oleracea var. cauliflora</i> .	56
Tabla 9. Composición química y distribución des extracto lipídico en la Calicata 1, Xochimilco, con cultivo de maíz.	58
Tabla 10. Composición química y distribución de lípidos en la Calicata 2, Tláhuac, Con cultivo de brócoli.	58
Tabla 11. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 1, con cultivo de cafeto.	60
Tabla 12. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 2, con cultivo de ajonjolí.	60
Tabla 13. Composición química y extracto ipídico en el Perfil 3, con cultivo de cacahuate.	62
Tabla 14. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 4, con cultivo de coco.	62
Tabla 15. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 1 (Thaptic Hapludand), La Pintada, Atoyac de Alvarez, Guerrero, cultivado con <i>Coffea arabica</i>	64.
Tabla 16. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 2 (Lithic Ustorthent), Tepecoacuilco de Trujado, Guerrero, cultivado con <i>Seasamum</i>	

<i>indicum.</i>	66
Tabla 17. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 3 (Typic Ustorthent), Tepecoacuilco de Trujado, Guerrero, cultivado con <i>Arachis hypogaea</i> .	68
Tabla 18. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 4 (Typic Ustipsamment), Coyuca de Benítez, Guerrero, cultivado con <i>Cocos nucifera</i> .	70
Tabla 19. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 5 (Typic Eutrudept), Cunduacán, Tabasco, cultivado con <i>Theobroma cacao</i> .	72
Tabla 20. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 6 (Typic Eutrudept), Puyacatengo, Tabasco, cultivado con <i>Cynodon spp.</i>	74
Tabla 21. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 7 (Typic Eutrudept), Puyacatengo, Tabasco, cultivado con <i>Theobroma cacao</i> .	76
Tabla 22. Composición química y distribución de lípidos en el Perfil 5, con cultivo de cacao.	78
Tabla 23. Composición química y distribución de lípidos en el Perfil 6, con pastizal.	78
Tabla 24. Composición química y distribución de lípidos en el Perfil 7, con cultivo de cacao.	78
Tabla 25. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 8 (Alfic Haplustand) Tanaquillo, Chilchota, Michoacán, cultivado con <i>Persea americana</i> .	80
Tabla 26. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 8, con cultivo de aguacate.	82
Tabla 27. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 9, con cultivo de brócoli.	82
Tabla 28. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 9 (Vertic Thaptic Haplustand), en el Valle de Tangancicuaro, Michoacán, cultivado con <i>Brócoli</i> .	84
Tabla 29. Coeficientes de correlación de Pearson entre el extracto lipídico total y los parámetros físicos y químicos, del suelo (0-10 cm). Correlaciones marcadas con un nivel de significancia en $p < .0500$.	86

Tabla 30. Composición química del extracto lipídico libre en suelos bajo diferentes Cultivos de la Calicata 1 (Xochimilco) y Calicata 2 (Tláhuac).	97
Tabla 31. Composición química del extracto lipídico libre en suelos (0-10 cm) bajo diferentes Cultivos, del Estado de Guerrero.	101
Tabla 32. Composición química del extracto lipídico libre en suelos (0-10 cm) bajo diferentes Cultivos, del Estado de Tabasco.	103
Tabla 33. Composición química del extracto lipídico libre en suelos (0-10 cm) bajo diferentes Cultivos, del Estado de Michoacán.	104
Tabla 34. Rendimiento (g kg^{-1}) del extracto lipídico libre, a partir del sistema.	118
Tabla 35. Comparación de los dos métodos de extracción lipídica en suelos cultivados con maíz (Calicata 1, 100-110 cm), a partir de su composición química.	123
Tabla 36. Comparación de los dos métodos de extracción lipídica en suelos bajo cafetomaíz (Perfil 1, 0-10 cm), a partir de su composición química.	125
Tabla 37. Contenido del carbono orgánico total, proporción de carbono orgánico en la fracción mineral y proporción de ácidos húmicos (AH) en muestras de suelos (0-10 cm).	128
Tabla 38. Valor nutritivo de algunos cultivos de importancia agrícola en México (De Chávez <i>et al.</i> , 1992).	196
Tabla 39. Coeficientes de determinación en las variables ambientales y parámetros del suelo, para los primeros tres ejes en el modelo de ACC, para el grupo de los alcanos.	198
Tabla 40. Coeficientes de determinación en las variables ambientales y parámetros del suelo, para los primeros tres ejes en el modelo de ACC, para el grupo de los ácidos grasos.	198

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Unidades estructurales de algunos lípidos detectados en el suelo (De: Dinel <i>et al.</i> , 1990).	7
Figura 2. Rutas biosintéticas de <i>n</i> -ácidos alcanoicos, <i>n</i> -alcanoles y <i>n</i> -alcanos en ceras vegetales (De: Lichtfouse, 1998 c).	8
Figura 3. Biosíntesis de los terpenoides (De: Killops y Killops, 1993).	9
Figura 4. Estructura química de triterpenos pentacíclicos de importancia geoquímica (De: Killops y Killops, 1993).	10
Figura 5. Biosíntesis de los esteroides (triterpenos tetracíclicos) (De: Killops y Killops, 1993).	11
Figura 6. Estructura química de esteroides con importancia geoquímica (De: Killops y Killops, 1993).	12
Figura 7. Formación de <i>n</i> -metilcetonas en el suelo, a través de la β -oxidación microbiana de: A) <i>n</i> -ácidos grasos y B) <i>n</i> -alcanos (De: Amblès <i>et al.</i> , 1993).	15
Figura 8. Representación esquemática de la estabilización de la fracción húmica del suelo, a partir de la encapsulación de pequeñas moléculas apolares (aislamiento físico), o por enlaces con biomarcadores funcionalizados (aislamiento químico) o preservación selectiva de biopolímeros alifáticos (De: Lichtfouse <i>et al.</i> , 1998 b).	27
Figura 9. Sistemas de operación más usuales de llevar a cabo la lixiviación a escala analítica. A)Discontinuo, B) Continuo (Soxhlet), C) Fluido supercrítico sin y con recirculación (De: Luque <i>et al.</i> , 1993).	29
Figura 10. Diagrama de fases sólido/líquido/gas/fluido supercrítico. PT: punto triple; PC: punto crítico; Pc: presión crítica; Tc: temperatura crítica (De: Luque <i>et al.</i> , 1993).	30
Figura 11. Localización de los sitios de muestreo (P = perfil y C = calicata).	37
Figura 12. Método de saponificación con potasa y metilación con cloruro de metanol de los extractos lipídicos del suelo.	43
Figura 13. Relación lineal entre el volumen de retención corregida y la longitud de cadena, para ácidos grasos de cadena corta en 137°C. Fase estacionaria	

de sílice DC 550 conteniendo ácido esteárico. -Δ-ácido de cadena lineal, -○- ácido de cadena ramificada (De: Gurr y James, 1980).	46
Figura 14. Análisis de regresión entre el carbono orgánico total y el contenido de lípidos totales. (a) los suelos de Xochimilco no fueron significativos. (b) los suelos de Tláhuac fueron altamente significativos. Las líneas punteadas representan el intervalo de confianza del 95%.	59
Figura 15. Análisis de regresión entre el carbono orgánico total y el contenido de de lípidos totales considerando todos los sitios de muestreo (calicatas y perfiles) para la profundidad 0-10 cm.	65
Figura 16. Análisis de Componentes Principales (ACP) en los sitios muestreados (0 – 10 cm de profundidad). Considerando los parámetros del suelo, ELT y las variables ambientales.	87
Figura 17. Relación de las variables ambientales (set 1) con los parámetros del suelo (set 2).	89
Figura 18. Representación de las variables ambientales y los parámetros del suelo en primer y tercer eje canónico del ACC. Con tres grupos e <i>n</i> -alcanos según el número de carbonos (AH= ácidos húmicos); N= nitrógeno).	91
Figura 19. Representación de las variables ambientales y los parámetros del suelo en primer y tercer eje canónico del ACC. Con tres grupos de <i>n</i> -ácidos según el número de carbonos.	92
Figura 20. Cromatograma parcial del ion <i>m/z</i> 57 correspondiente a la serie homóloga de <i>n</i> -alcanos presentes en la fracción neutra y el espectro de masas del nonaeicosano (C ₂₉), en los lípidos libres de suelos con cultivo de cafeto.	94
Figura 21. Cromatograma parcial del ion <i>m/z</i> 74 correspondiente a la serie homóloga de <i>n</i> -ácidos grasos presentes en la fracción ácida metilada y el espectro de masas del octadecanoico (C ₁₈) en los lípidos libres de suelos con cultivo de cafeto.	95
Figura 22. Cromatograma parcial del ion <i>m/z</i> 59 correspondiente a la serie homóloga de <i>n</i> -metilcetonas presentes en las muestras y el espectro de masas de la octaeicosanona (C ₂₈) en los lípidos libres de suelos con cultivo de cafeto.	95
Figura 23. Cromatograma parcial del ion <i>m/z</i> 82 correspondiente a la serie homóloga	

de <i>n</i> -aldehídos presentes en las muestras y el espectro de masas del tricosanal (C ₃₀) en los lípidos libres de suelos con cultivo de café.	96
Figura 24. Series homólogas de: a) <i>n</i> -alcanos, b) <i>n</i> -ácidos grasos, c) <i>n</i> -metilcetonas y d) <i>n</i> -aldehídos, determinados en la fracción de lípidos libres de los suelos de Xochimilco y Tláhuac.	98
Figura 25. Ruta degradativa del fitol, según el carácter óxico/anóxico del medio deposicional (<i>De</i> : García-Mollá, 1994).	105
Figura 26. Espectros de masas de 2,6,10,14-tetrametilpentadecano (pristano), 2,6,10,14-tetrametilhexadecano (fitano), nonadecano y eicosano en los lípidos libres de suelos con cultivo de café.	106
Figura 27. Espectro de masa del escualeno, en extracto de lípidos libres de suelos con cultivo de cacahuete.	107
Figura 28. Espectro de masas del A) colestán 4,4-dimetil-, (5.alfa); B) colest-4 en-3-ona.	108
Figura 29. Espectros de masas de A) Estigmast-5-en-3-ol; B) (24R)-4-Estigmasten-3-ona; C) Ergost-5-en-3-ol, en el extracto de suelos con café.	109
Figura 30. Espectro de masas de A) α o β amirin (en suelos con cultivo de Café); B) Taraxerol (con cultivo de maíz).	111
Figura 31. Estructura general de hopanos con sus configuraciones más características I) 17 α (H), 21 β (H)-hopanos; II) 17 β (H), 21 β (H)-hopanos; (III) 17 β (H), 21 α (H)-moretanos (<i>En</i> : García-Mollá, 1994).	112
Figura 32. Espectros de masas de los hopanos (C ₂₉) a) 17 α (H), 21 β (H) (I); 17 β (H), 21 α (H)-C ₂₉ (II) y 17 β (H), 21 β (H)-C ₂₉ (III) (<i>En</i> : García-Mollá, 1994).	114
Figura 33. Formación de los 17,21- <i>seco</i> hopanos por degradación bacteriana del hop-(17(21)-eno (Trendel <i>et al.</i> , 1982).	114
Figura 34. Espectro de masas del 17,21- <i>seco</i> hopano identificado en los Perfiles 2, 4 y 7.	115
Figura 35. Cromatogramas Iónicos Totales de los extractos lipídicos en suelos antropogénicos, cultivado con maíz (100-110 cm), a partir de diferentes métodos de extracción.	120
Figura 36. Cromatogramas Iónicos Totales de los extractos lipídicos libres en	

suelos de origen genético, cultivado con café Perfil 1 (0-10 cm), a partir de diferentes métodos de extracción.	122
Figura 37. Espectros de infrarrojos de los AH en muestras de suelos, de los municipios de Xochimilco y Tláhuac, bajo diferente cubierta vegetal.	130
Figura 38. Espectros de infrarrojos de los AH en muestras de suelos, (0-10 cm), del Estado de Guerrero, bajo diferente cubierta vegetal.	132
Figura 39. Espectros de infrarrojos de los AH en muestras de suelos (0-10 cm), del Estado de Tabasco, bajo diferente cubierta vegetal.	134
Figura 40. Espectros de infrarrojos de los AH en muestras de suelos (0-10 cm), del Estado de Michoacán, bajo diferente cubierta vegetal.	136
Figura 41. Análisis de regresión entre los contenidos de arcilla y el extracto lipídico total considerando todos los sitios de muestreo (calicatas y perfiles), para la profundidad de 0-10 cm.	137
Figura 42. D-RX en suelos de los Municipios de Xochimilco (Calicata 1) y Tláhuac (Calicata 2).	141
Figura 43. D-RX en suelos (0-10 cm) del Estado de Guerrero.	143
Figura 44. D-RX en suelos (0-10 cm) del Estado de Tabasco.	146
Figura 45. D-RX en suelos (0-10 cm) del Estado de Michoacán.	148
Figura 46. Espectro de masas del A) $17\alpha(H),18\alpha(H),21\beta(H)-28,30$ Bisnorhopano; B) 30-Norneohop-13(18)-ano; C) Hop-22(29)-ano (<i>En</i> : Philip and Gilbert, 1986).	194
Figura 47. Espectros de masas del C_{27} -hopanos, a) $17\alpha(H)-22,29,30$ -trisorhopano y b) $17\beta(H)-22,29,30$ -trisorhopano (<i>En</i> : Philip and Gilbert, 1986).	195

RESUMEN

Los lípidos en el suelo se heredan de los sistemas biológicos que logran conservar su esqueleto molecular a través del tiempo con pocos cambios estructurales. Cuando se asocian a la fracción arcilla-humus son capaces de resistir a la biodegradación, su ventaja en los estudios edafogenéticos y medioambientales radica en que se pueden aislar del suelo sin desnaturalización total. La importancia del extracto lipídico total (ELT) radica en que podemos inferir información concerniente al origen, dinámica o transformación de la materia orgánica del suelo (MOS) en los ecosistemas.

El objetivo de la investigación consistió en realizar la caracterización molecular y del contenido y distribución de los lípidos libres y ligados a la fracción arcilla-humus en suelos de diferentes agroecosistemas (anuales y perennes).

La investigación se realizó en suelos de 9 perfiles y 2 calicatas (origen antrópico), los cuales se caracterizaron y clasificaron a partir de sus parámetros físicos y químicos. Los lípidos totales se extrajeron con éter de petróleo:diclorometano (3:1). Los extractos fueron analizados por Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas (CG/EM). Además se aisló la fracción arcilla-humus que se caracterizó por espectroscopia de infrarrojo (IR) y difracción de rayos-X. Los contenidos del ELT de los suelos, para los diferentes agroecosistemas, variaron entre 0.1 a 13.0 g kg⁻¹, los cuales se encuentran en el rango de valores reportados para suelos con diferente distribución geográfica mundial. En los suelos de origen antrópico el carbono orgánico total (COT) se incrementa con la profundidad. A su vez, en estos suelos se observa un incremento directamente proporcional entre el COT y el ELT, con una correlación altamente significativa ($r = 0.78$). Además, el ELT de estos suelos se encuentra ligado, principalmente, a la fracción arcilla-humus.

Los suelos estudiados con desarrollo genético se incluyen en los órdenes: Andisol, Entisol e Inceptisol, en donde más del 90% del ELT se concentra en los primeros centímetros del perfil. En los agroecosistemas cafetaleros, con cobertura vegetal perenne, existe la mayor estabilidad de MOS, reflejado en los altos contenidos de COT (76 g kg⁻¹), ELT (4.58 g kg⁻¹) y ácidos húmicos (AH) (46 g kg⁻¹), debido a que la acidez del suelo y la presencia de alofano favorecen la acumulación de los compuestos lipídicos al formar complejos organominerales.

Los estudios realizados a través de IR permitieron determinar la dominancia de los AH de

cadena aromática frente a los AH de cadenas alifáticas. Esto debido a que los espectros de IR de los AH indican una mayor intensidad en la región de 1600 cm^{-1} (que corresponde a vibraciones C=C en anillos aromáticos) en relación a las señales a 2920 cm^{-1} (con vibraciones de grupos alquilos CH_2 , alifáticos), a la vez que se registran las bandas de absorción típica de estas sustancias en las regiones 3400 , 1720 , 1400 y 1200 cm^{-1} . Por otro lado, con los análisis por CG/EM se determina que la materia orgánica de la matriz del suelo deriva, principalmente de las plantas terrestres y de la actividad microbiana, dado que se han identificado varios compuestos orgánicos, propios del proceso de descomposición de estos materiales, tales como: *n*-alcanos y *n*-ácidos grasos con más de 22 átomos de carbono, triterpenos de tipo oleano, ursano y taraxerol. Así como, aquellos propios de la actividad microbiana tales como: *n*-alcanos y *n*-ácidos grasos con menos de 22 átomos de carbono, *n*-metilcetonas, eteroles y triterpenos de tipo hopano.

Los análisis estadísticos demostraron que las variables ambientales: altitud, temperatura, precipitación, pendiente y cobertura vegetal (anual y perenne) actúan sobre el ELT de los suelos. Los parámetros que mejor explican la distribución y dominancia de los grupos de *n*-alcanos y los *n*-ácidos grasos en los suelos son la temperatura, pendiente, nitrógeno y COT, AH y ELT.

Se concluye que la caracterización molecular del ELT de los suelos, así como el grado de humificación y la determinación de la fracción mineral (relación de carbono orgánico) con las partículas del suelo y la identificación de las arcillas, representan las bases adecuadas para establecer indicadores en los procesos edafogenéticos.

ABSTRACT

Lipids in soils are inherited of the biological systems that are able to preserve their molecular skeleton through the time with few structural change approaches. When these are associated to the clay-humus fraction are able to stand against the biodegradation, their advantage in the edaphogenic and environmental studies to become established in that they can become isolated of the soils without total denaturalization. The importance of the extract lipidic total (TLE) lies in that we can infer information relating to the origin, dynamics or transformation of the organic matter of the soil (SOM) in the ecosystems.

The objective of the research has involved accomplishing a characterization molecular, the contents and distribution of the free lipids as well as bounded lipids to the clay-humus fraction in soils of different agroecosystem (annual and perennial).

The research was accomplished in soils of 9 profiles and 2 trial pits (anthropic origin), which were characterized and classified as from their physical and chemicals parameters. The total lipids was extracted with petroleum ether: dichloromethane (3:1). Extracts were analysed by Gases Chromatography and Mass Spectrometry (GC/MS). In addition clay-humus fraction was separated and it characterized by infrared spectroscopy (IR), and diffraction of X-rays.

The contents of total lipids in extracts (TLE) of sampled soils was from 0.1 to 13.0 g. Kg⁻¹, which are founded within the range of values reported for soils with different geographical distribution round the world. In the soils from anthropic origin the total organic carbon (TOC) is incremented with depth. In turn, in these soils a directly proportional increase between the TOC and the TLE are observed, with a highly significant correlation ($r = 0.78$). Besides, the extract lipid of these soils is mainly bound to the clay-humus fraction.

Soils with a genetic development were included in the orders of: Andisols, Entisols and Inceptisols in which 90% of TLE is concentrated within the profile's first centimeters. The coffee growing agro ecosystem with perennial vegetation presents the greatest stability of SOM, reflected in the high contents of COT (76 g kg⁻¹), TLE (4.58 g kg⁻¹) and humic acid HA levels reach (46g kg⁻¹), where soil acidity and presence of Allophane play an important role in lipid compound accumulation.

The carried out researches through IR in the HA allowed determining the domain of aromatic chain as opposed to the HA of aliphatic chains. This because IR of the HA have a greater

intensity at 1600 cm^{-1} region (that the C corresponded to vibrations C in aromatic rings) in relation to the signs to 2920 cm^{-1} (with vibrations of alquil groups CH_2 , aliphatics), at the same time as 3400 , 1720 , 1400 and 1200 cm^{-1} register the typical absorption bands of these substances at the regions. On the other hand, the analyses by GC/MS it suggest that SOM originated mainly by terrestrial plants and microbial activity, granted that some organic, right on compounds of the process of decay of these materials, such have provided evidence of identity such as: *n*-alkanes and *n*-fatty acids with over 22 atoms of carbon, triterpens of type olean, ursan and taraxerol. Thus like, those own of the microbial activity such as: *n*-alkanes and *n* fatty acids with less than 22 carbon atoms, *n*-methylketones, sterols and triterpens of type hopanes.

The statistical analyses showed than the environmental variables altitude, temperature, precipitation, slope and vegetable coverage (annual and perennial) act on the TLE of the soils. The parameters that better explained the distribution and domain of the groups of *n*-alkanes and them *n*-fatty acids in the soils are the temperature, slope, nitrogen and TOC, AH and TLE. It is concluded to the molecular characterization of the TLE of the soils, as well as the level of humification and the determination of the mineral fraction (relation of organic carbon) with the particles of the soil and the identification of clays, they represent the appropriate bases to establish indicators in the edaphogenic processes.

I. INTRODUCCION

La calidad de la materia orgánica del suelo (MOS) es un factor esencial en la sostenibilidad del recurso suelo. La MOS participa activamente en la estabilidad y productividad de los ecosistemas, tanto de los inalterados como de los sometidos a la intervención humana; influyendo directa e indirectamente en el potencial del suelo y satisfaciendo las necesidades de la población humana cada vez más numerosa.

La MOS es considerada como un parámetro integrador, ya que actúa a distintos niveles de los procesos físicos, químicos y biológicos que se desarrollan en el sistema, y a su vez, se caracteriza por presentar elevada variabilidad en el espacio y tiempo. Es importante mencionar, que en estos procesos destacan los relacionados con el suministro de nutrientes, la actividad biológica, la estructura, la infiltración del aire-agua y la disminución de los riesgos de erosión (Gregorich *et al.*, 1994).

La calidad de la MOS puede evaluarse a partir de la valoración de sus distintos componentes, lo que permite monitorizar (en muchos casos), en periodos cortos el balance de materia y energía. Entre los indicadores más comúnmente aceptados de la calidad y grado de evolución de la MOS se cuentan el carbono orgánico, el nitrógeno, la fracción ligera, la biomasa microbiana, los carbohidratos, así como la actividad enzimática.

Por otro lado, en algunas investigaciones se han utilizado las características del humus, como indicadores de la capacidad del medio edáfico para transformar la MOS, relacionando así su alteración y neoformación. Sin embargo, estudios recientes han relegado a un segundo plano la compleja caracterización del humus, centrándose en la información que proporciona el estudio de los lípidos del suelo. Es importante mencionar que los lípidos tanto en forma libre como ligada a la fracción arcilla-humus, pueden aislarse sin producir demasiadas alteraciones

en su composición molecular, por lo que sus características bioquímicas conducen a resultados más precisos sobre la dinámica o transformación de la MOS, tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos (Almendros, 2000).

Los lípidos del suelo son producto de la síntesis y descomposición parcial de la biomasa de plantas, animales y microorganismos; pueden resistir a la biodegradación y permanecer por largos períodos e interactuar al mismo tiempo con cationes. Por todo ello su acumulación puede incrementarse con la acidez y anaerobiosis, así como inducir propiedades hidrofóbicas en determinados tipos de suelo (Schnitzer, 1978).

Es necesario resaltar que en las últimas décadas se ha incrementado el interés por el estudio de los lípidos, como resultado de progresos importantes en el avance de técnicas analíticas instrumentales, como son la espectroscopía de infrarrojo, la resonancia magnética nuclear y en particular por las técnicas de separación e identificación entre las que destaca el empleo combinado de cromatografía de gases y espectrometría de masas (CG-EM).

Los lípidos han sido estudiados extensivamente en sedimentos con el fin de proporcionar información sobre el origen de la MO y sus rutas diagénéticas (Goñi *et al.*, 2005, Hostettler *et al.*, 1999; Marlow *et al.*, 2001), en los suelos estos grupos se han utilizado como biomarcadores, ya que su caracterización molecular puede proporcionar información sobre el origen de la MOS, así como su degradación y mecanismos de preservación, tanto en los horizontes orgánicos (O y A), como en horizontes minerales (B y C), además se han realizado investigaciones a nivel de partícula para establecer sus mecanismos de preservación en el medio (arena, limo y arcilla) (Naafs *et al.*, 2004a; Quenea *et al.*, 2004; Rumpel *et al.*, 2004).

En los suelos, las plantas vasculares representan la principal fuente de carbono orgánico, como resultado de sus aportes en litter y raíces (Oades, 1993), por lo que estos materiales están

relacionados directamente con la composición molecular de los lípidos; los cuales son considerados como una fuente de información ecológica acerca de la estructura de los sistemas tróficos (Almendros, *et al.*, 2001) y un indicador en el desempeño del ciclo biogeoquímico del carbono (Stevenson, 1982).

Parte de las investigaciones de lípidos en suelos se han desarrollado en ambientes con actividades forestales (Almendros *et al.*, 1996; Naafs *et al.*, 2004b), así como en suelos agrícolas (Jandl *et al.*, 2004 Wang, *et al.*, 1971; Zelles y Bai, 1993) donde se explican algunos de los procesos edafogénicos, manejo del suelo y prácticas agrícolas orgánicas.

A diferencia de otros países, donde existe cierta tradición en el estudio analítico de los lípidos, en México los estudios son limitados, por lo que la presente investigación aporta información sobre los contenidos, distribución y composición molecular de los lípidos en suelos bajo diversos cultivos y sistemas de manejo agrícola. Aparte de ello, la fracción coloidal del suelo es considerada como la de mayor superficie específica y por tanto con actividad química más significativa. Dentro de este grupo se incluyen las sustancias húmicas y arcillas, que en la mayoría de los casos pueden formar complejos arcilla-humus, y desarrollar condiciones adecuadas para aumentar la reserva de carbono en los sistemas naturales y manejados. Por ello se consideró necesario analizar los factores que relacionan la composición de la fracción lipídica con la estructura y propiedades de la matriz órgano-mineral en diferentes tipos de formaciones edáficas.

II. REVISION DE LITERATURA

1. Lípidos en el suelo

1.1. Principales grupos

La materia orgánica actúa sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, la intensidad de su efecto depende de las condiciones ambientales, así como del manejo de los ecosistemas. La MOS representa una mezcla compleja de sustancias orgánicas heredadas de organismos superiores y microorganismos y afectada por diversos niveles de alteración, variando desde la denominada *litter* (hojarasca, residuos vegetales y microbianos) hasta productos estables que resultan de su degradación y posterior síntesis abiótica o microbiana. La MOS está compuesta tanto de *substancias húmicas* como *no húmicas*; las primeras están caracterizadas como productos altamente polimerizados, polidispersos, ácidos, amorfos y con masas moleculares que van desde 2 000 a 200 000 UD, donde están incluidos los ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas. Estos materiales húmicos se originan de la degradación y neosíntesis de residuos orgánicos a través de mecanismos físicos, químicos y biológicos (Schnitzer, 1991).

El grupo de sustancias no húmicas, está constituido por compuestos provenientes de la actividad biológica, donde se incluyen los carbohidratos, ligninas, proteínas, y ácidos nucleicos, así como compuestos sencillos como son los aminoácidos, alcoholes, aldeídos, cetonas, pigmentos, alcaloides, antibióticos, vitaminas, ácidos orgánicos de bajo peso molecular y lípidos; en conjunto representan una gran proporción de los compuestos orgánicos conocidos en la naturaleza (Dinel *et al.*, 1990; Schnitzer, 1978; Schnitzer, 1991; Tan, 1986).

En particular, la fracción de lípidos está constituida por un grupo heterogéneo de biomoléculas, cuya característica distintiva es su insolubilidad en el agua y posibilidad de extraerse con solventes orgánicos (cloroformo, hexano, éter de petróleo, benceno, metanol, etc.). A pesar de que en algunos casos esta definición hace referencia exclusivamente a unas propiedades muy generales de la molécula, existen ciertas regularidades estructurales que permiten clasificar los lípidos de forma más precisa, como por ejemplo, a partir del esqueleto estructural del carbono, o a su capacidad de saponificación en medio alcalino. La clasificación propuesta por Battaner (1993) incluye a la mayoría de los compuestos lipídicos (Tabla 1). En la Figura 1, se hace referencia a algunas de las fórmulas químicas de lípidos detectados en el suelo.

Tabla 1. Clasificación de lípidos (Battaner, 1993).

Grupo	Esqueleto
I. Lípidos saponificables	Esteres de ácidos grasos
Ia. Lípidos	Ácidos grasos
Ib. Lípidos neutros	Acilglicéridos Ceras
Ic. Lípidos	Fosfolípidos Glicolípidos Sulfolípidos Esfingolípidos
II. Lípidos insaponificables	Unidades de isoprenoides (5C)
IIa. Esteroides	Hexaisoprenoides, estructurados en un sistema cíclico
IIb. Terpenos	Productos naturales

Los *n*-alcanos, que se incluyen dentro de la fracción lipídica son compuestos abundantes en los suelos y sedimentos. Muchos de ellos son *n*-alcanos biosintetizados por plantas superiores; pueden proceder de la reducción de alquenos biológicos en algas, así como de la reducción de

alcoholes grasos en bacterias y plantas superiores. Frecuentemente se originan a partir de la reducción o decarboxilación de los ácidos grasos o de la degradación de biopolímeros altamente alifáticos. Sin embargo, una porción sustancial de *n*-alcanos pueden también presentar un carácter xenobiótico, procediendo de los combustibles fósiles (Amblès *et al.*, 1993; Lichtfouse, 1998c).

Los ácidos grasos son sillares característicos de muchos tipos de lípidos. Están constituidos por una cadena hidrofóbica y al menos de un grupo carboxilo, que les confiere propiedades polares. El enlace covalente de los ácidos grasos con grupos lipídicos, puede romperse a través de hidrólisis química o enzimática. La diversidad del grupo está determinada por la longitud de la cadena, así como la posición de enlaces dobles o grupos metilo. Otros lípidos distribuidos ampliamente son las ceras, formadas por ésteres de ácidos grasos de cadena larga saturados o no saturados (C₁₄-C₃₆), junto con alcoholes grasos de cadena larga (C₁₆-C₂₂).

Los fosfolípidos son unidades estructurales de las membranas celulares, contienen dos ácidos grasos esterificados con los grupos OH del glicerol y un ortofosfato que se encuentra esterificado con el tercer oxhidrilo. Esta última substitución aumenta en cierta medida su afinidad por el agua, a pesar que el resto de la molécula permanece hidrofóbica; en algunos casos puede existir una unión éster a nivel del fosfato, con alcoholes nitrogenados como la colina, etanolamina o serina.

Estudios en suelos, utilizando isótopos radiactivos de carbono demostraron que los *n*-ácidos alcanoicos, *n*-alcanos, y *n*-alcanoles, derivan del mismo precursor químico. La distribución de los lípidos alifáticos de cadena larga frecuentemente muestra una preferencia en el número de carbonos, siendo mayoritariamente pares para *n*-ácidos alcanoicos y *n*-alcanoles, o impares en

el caso de los *n*-alcanos, los cuales pueden originarse de materiales biológicos como las ceras vegetales, algas, hongos y bacterias. Por ejemplo, cuando el ácido palmítico (C₁₆) es elongado

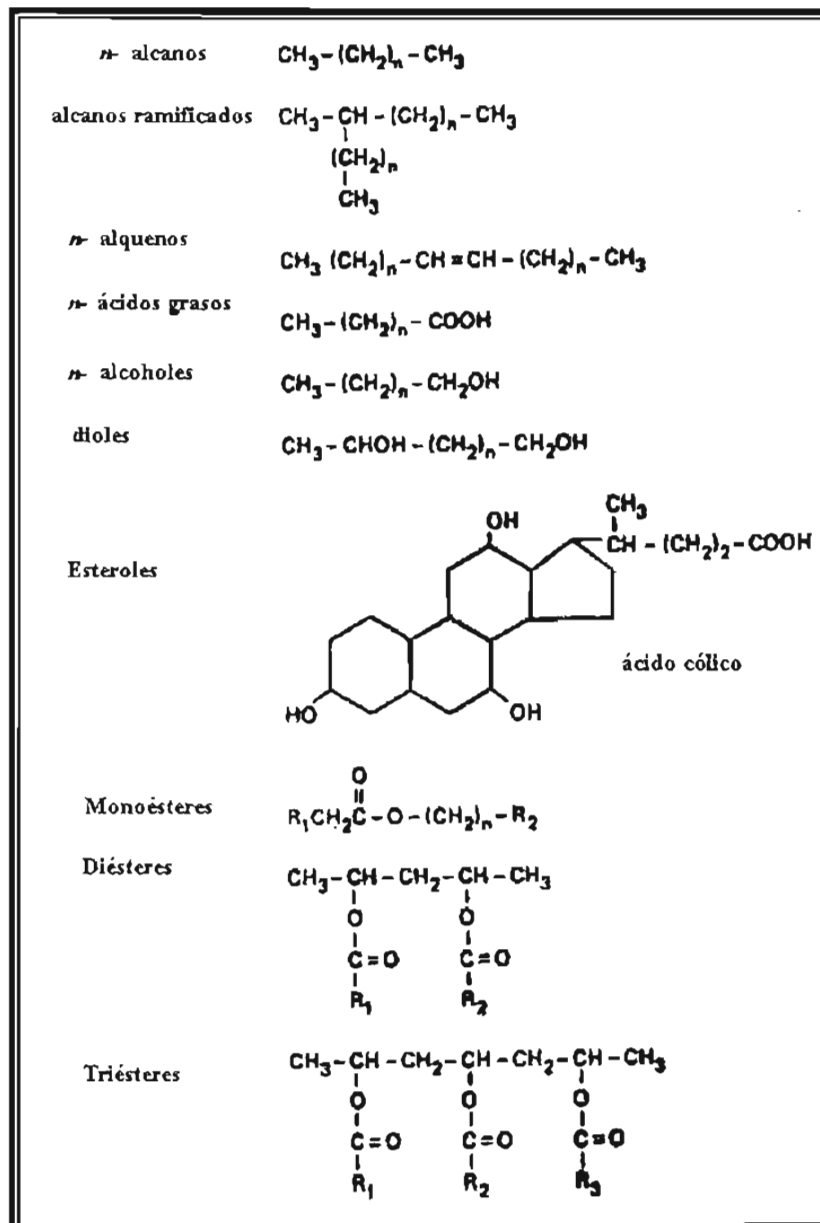


Figura 1. Unidades estructurales de algunos lípidos detectados en el suelo (De: Dinel *et al.*, 1990).

mediante adiciones sucesivas de dos unidades de carbono hasta que la longitud de la cadena alcanza, por ejemplo del orden de C₂₈, puede llevarse a cabo una reducción o decarboxilación para originar alcoholes C₂₈ o alcanos C₂₇ respectivamente, (Figura 2).

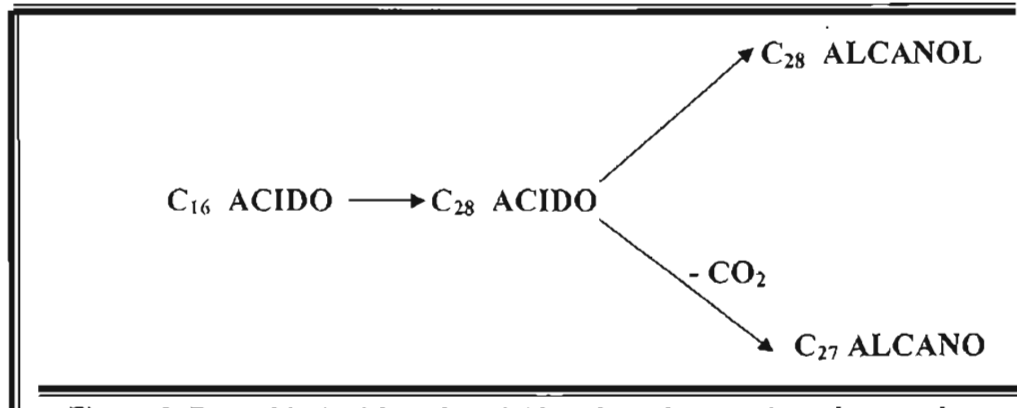


Figura 2. Rutas biosintéticas de *n*-ácidos alcanoicos, *n*-alcoholes y *n*-alcanos en ceras vegetales (De: Lichtfouse, 1998 c).

Los lípidos insaponificables conforman un grupo importante en los suelos que incluyen tanto a los esteroides como a los terpenos; estos últimos son lípidos que despliegan una gran diversidad de estructuras y funciones. Sin embargo, existe una característica que los unifica, ya que todos están constituidos de unidades de isopreno (C₅). Por lo tanto, se agrupan con base en el número de unidades de isopreno: los monoterpenos contienen 2 unidades, sesquiterpenos 3, diterpenos 4, triterpenos 6, tetraterpenos 8 y los politerpenos que contienen un gran número de unidades; un ejemplo de estos últimos son los distintos tipos de látex naturales. En realidad los terpenos son biosintetizados a partir de unidades de acetato derivados del metabolismo primario de ácidos grasos, carbohidratos y algunos aminoácidos. La acetil coenzima A, está involucrada en la generación de la unidad mevalonato (C₆), proceso que involucra una reducción en presencia de NADPH y subsecuentemente la decarboxilación y fosforilación, originándose la unidad fundamental de los isoprenoides (pirofosfato de isopentilo), a partir de

la cual los terpenoides son sintetizados mediante reacciones enzimáticas de condensación (Figura 3).

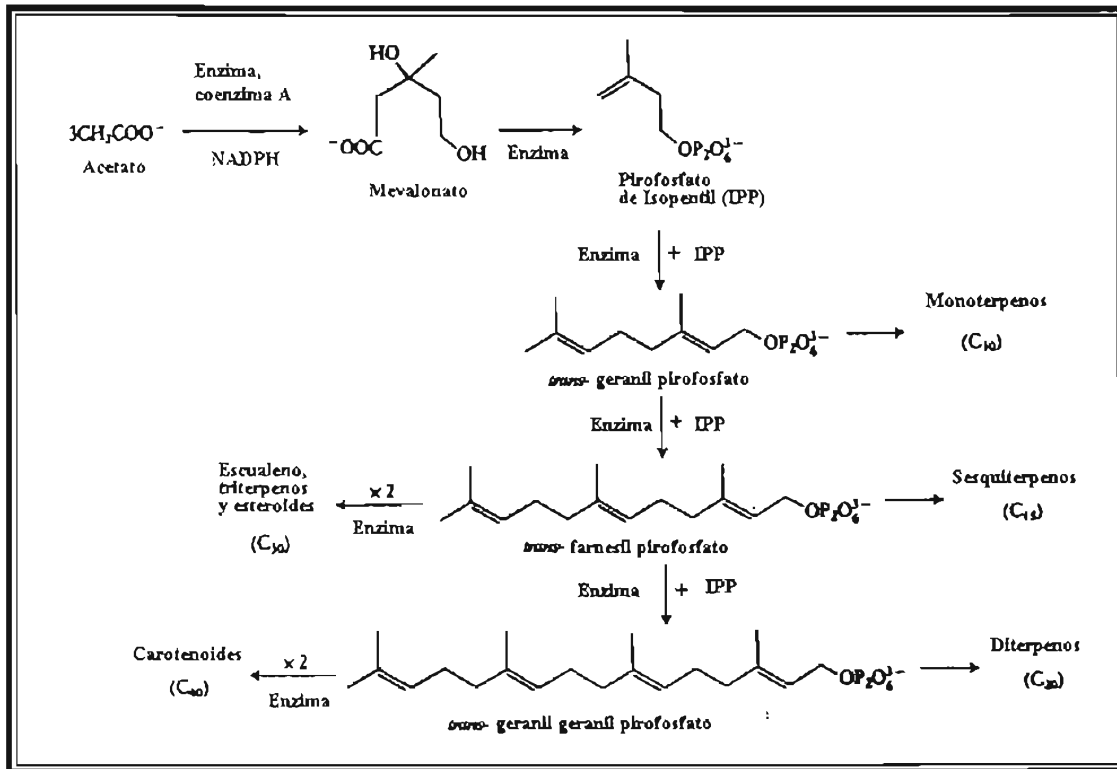


Figura 3. Biosíntesis de los terpenoides (De: Killops y Killops, 1993).

Todos los triterpenos y esteroides derivan del escualeno, isoprenoide acíclico ($\text{C}_{30}\text{H}_{50}$), el cual es un constituyente ubicuo de los organismos. Los triterpenos pueden ser tanto tetracíclicos como pentacíclicos. Estos últimos se encuentran normalmente en las plantas superiores, en donde pueden distinguirse tres importantes series: oleanos, ursanos y lupanos. Otra serie importante son los hopanos localizados en la membrana celular de las bacterias. La mayoría de los triterpenos pentacíclicos (C_{30}) de origen vegetal contienen 6 carbonos en el anillo E; en contraste con los hopanoides (Figura 4), con 5 carbonos en el anillo E (Killops y Killops, 1993).

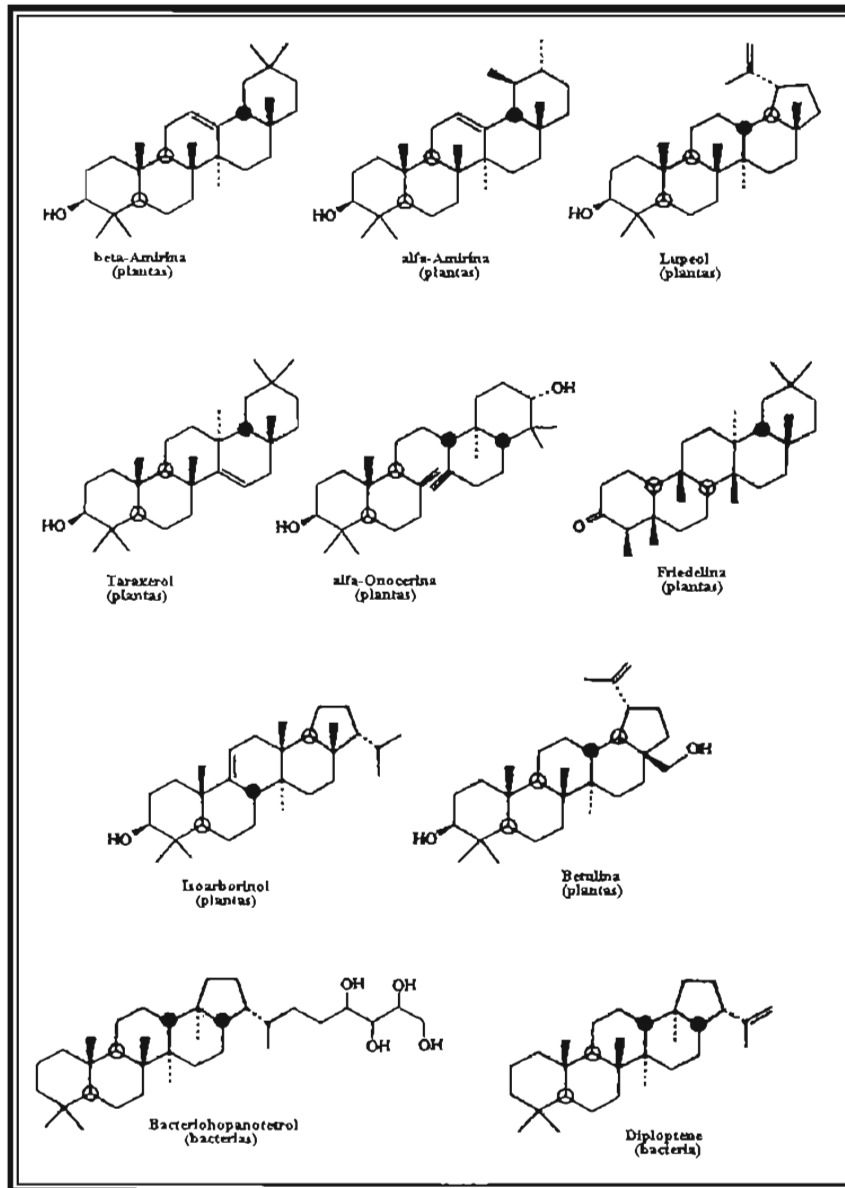


Figura 4. Estructura química de triterpenos pentacíclicos de importancia geoquímica (De: Killips y Killips, 1993).

Los esteroides, por su parte, resultan de la oxidación enzimática del escualeno seguida por su ciclización, por lo que se produce tanto el cicloartenol (precursor de esteroides vegetales) como el lanosterol (precursor de esteroides animales, fúngicos y a su vez de algunos esteroides vegetales) (Figura 5).

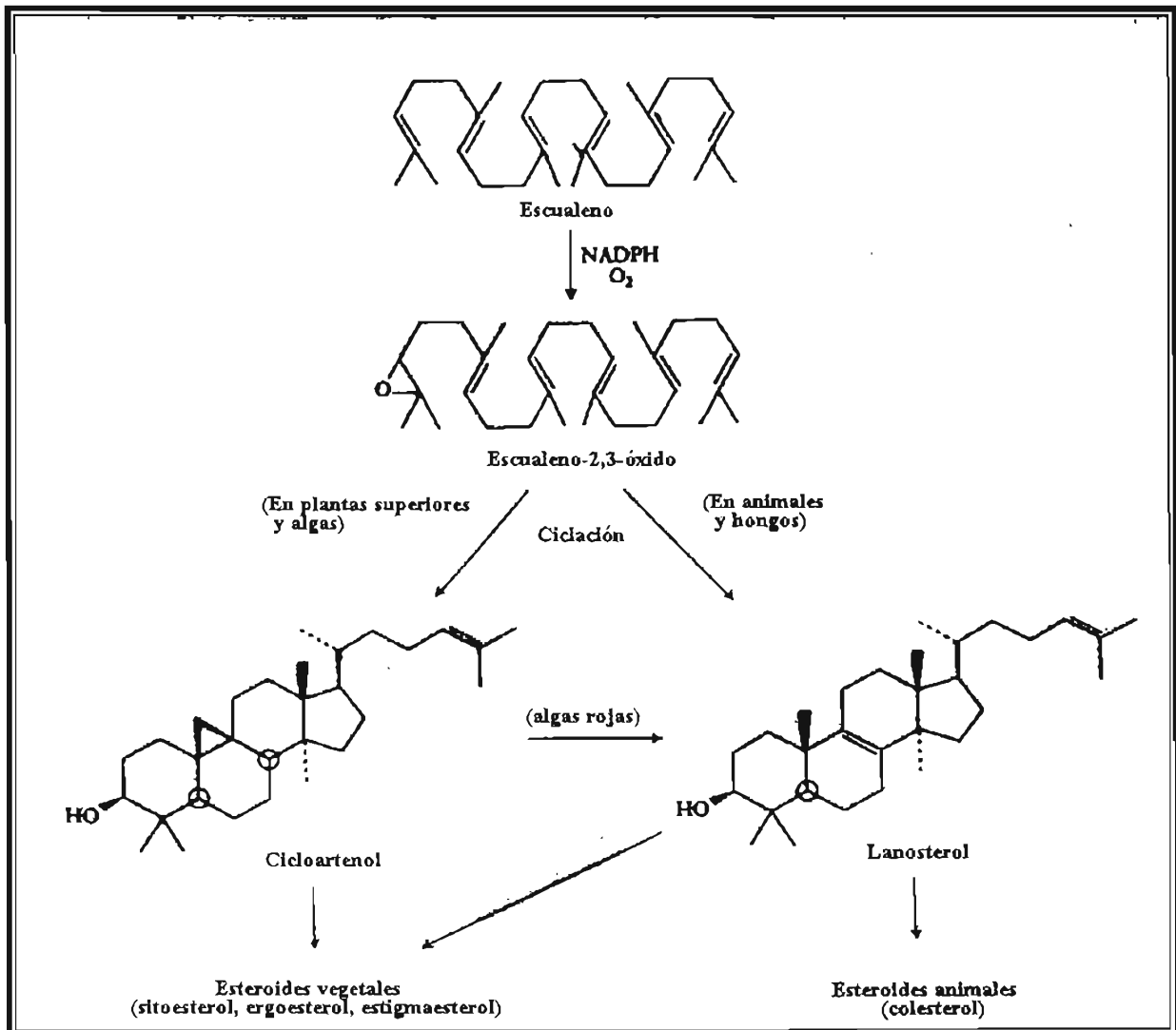


Figura 5. Biosíntesis de los esteroides (triterpenos tetracíclicos) (De: Killops y Killops, 1993).

Los esteroides (triterpenos tetracíclicos) con significado geoquímico en su mayoría fluctúan entre C_{27} a C_{30} , con un grupo β -hidroxi en el C_3 , un enlace doble $C=C$ en el sistema de anillos en la posición 5 y 6, además de una cadena lateral saturada o no saturada en el anillo D (C_{17}); los principales esteroides en plantas superiores son el β -sitosterol y el estigmasterol (Figura 6) (Gurr y James, 1980; Killops, y Killops, 1993).

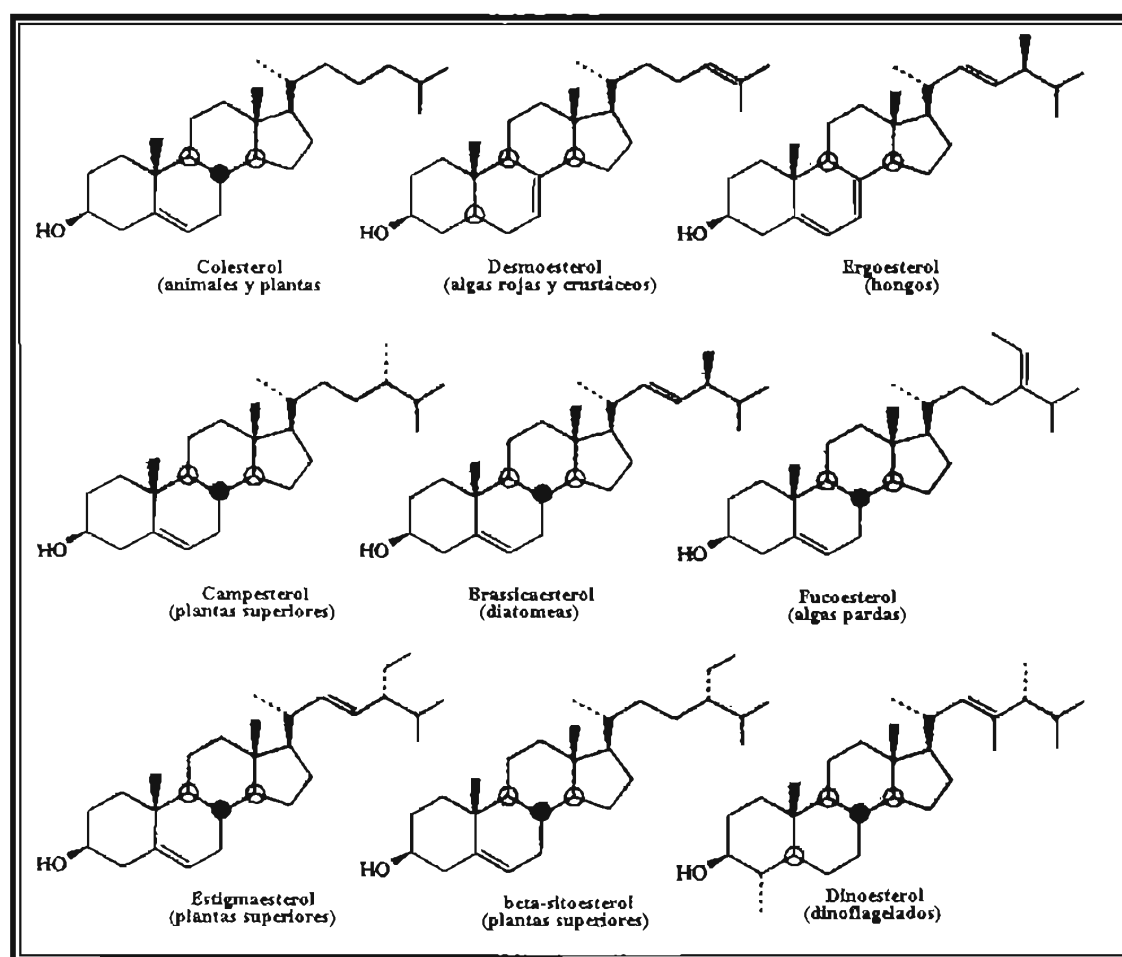


Figura 6. Estructura química de esteroides con importancia geoquímica (De: Killops y Killops, 1993).

1.2. Lípidos como biomarcadores

Los biomarcadores del suelo se definen como moléculas directamente heredadas de los sistemas biológicos (animales, plantas y microorganismos), que conservan su esqueleto molecular a través del tiempo con pequeños cambios estructurales. El término biomarcador surge de la relación producto-precursor que existe entre algunas estructuras químicas y la composición molecular de los organismos. Dentro de este grupo, se han caracterizado algunos compuestos lipídicos que logran persistir selectivamente bajo diferentes condiciones ambientales (García-Mollá, 1994).

Los biomarcadores en los sistemas edáficos se relacionan con los organismos y los procesos responsables de la formación de la MOS, facilitando el monitoreo de la calidad de los ecosistemas e indicando si el origen de ésta es natural o resultado de actividades antrópicas (Almendros *et al.*, 1996; González-Vila *et al.*, 1996b).

Los carbohidratos y proteínas son solubles en el agua y por tanto, degradados con mayor facilidad en el suelo (Breger, 1973). Como caso particular en el grupo de los glucolípidos, la fracción de carbohidrato se degrada en primer lugar, y representa una fuente de energía y carbono de mayor disponibilidad para los microorganismos, en contraste el fragmento de lípido rico en carbono puede acumularse en el suelo (Fridland, 1985).

Algunos estudios han demostrado que los métodos clásicos de cuantificación microbiana del suelo, como los cultivos y la estimación del ácido murámico, en ocasiones subestiman a las poblaciones microbianas, debido a su crecimiento selectivo en medios artificiales, y a la dificultad de separar a los organismos que se encuentran adheridos a las partículas del suelo. Por ello, se ha propuesto la cuantificación de compuestos bioquímicos específicos de los

organismos en donde se incluye al ATP, glucosaminas, ergosterol, lipopolisacáridos y fosfolípidos.

En el grupo de los hongos el compuesto predominante es el ergosterol y su identificación ha proporcionado un método sensible y rápido en la cuantificación de niveles de invasión fúngica en materiales vegetales, así como una relación de su incorporación a la biomasa del suelo (Tunlid y White, 1992).

Al mismo tiempo, el análisis de lípidos es importante en la clasificación taxonómica de los microorganismos especialmente en los procariontes, ya que se ha demostrado que el contenido de fosfolípidos en diferentes bacterias varía entre 4 y 91 mg g⁻¹ de peso seco, el cual es determinado por los diferentes taxones. Se ha observado que los ácidos grasos impares y ramificados son originados por las bacterias Gram (+), a diferencia de los compuestos pares, lineales y ciclopropilos que dominan en las bacterias Gram (-); sin embargo, los ácidos grasos lineales tienen un menor potencial taxonómico pues su producción es ubicua; en cambio en la mayoría de los actinomicetos, pueden dominar los ácidos grasos ramificados de tipo *iso* y *anteiso*. Los procariontes generalmente coinciden con los ácidos grasos polinsaturados, y las insaturaciones son tanto de origen aeróbico como anaeróbico; sin embargo, el isómero Cis Δ^9 en los ácidos grasos es usualmente producido por la desaturación dependiente del oxígeno; mientras que el mayor representante de la desaturación anaeróbica es el 18:1, ya que estos compuestos han sido estrictamente encontrados en todas las bacterias anaeróbicas. La diversidad de los ácidos grasos puede reflejar la complejidad de los microorganismos presentes en los suelos; los hidroxiacidos grasos de cadena media son ubicuos y pueden originarse tanto de bacterias como de plantas superiores. (Schutter y Dick, 2000; Tunlid y White, 1992; Zelles y Bai, 1993).

A partir de la identificación de la fracción cetónica en lípidos, es posible diferenciar algunos de los principales grupos biológicos que participan en su síntesis, por ejemplo las *n*-metilcetonas son de origen microbiano, especialmente del grupo de los hongos, ya que son capaces de sintetizarlos mediante la β -oxidación *in situ* de alcanos y ácidos grasos; o de la decarboxilación en los ácidos grasos (Figura 7).

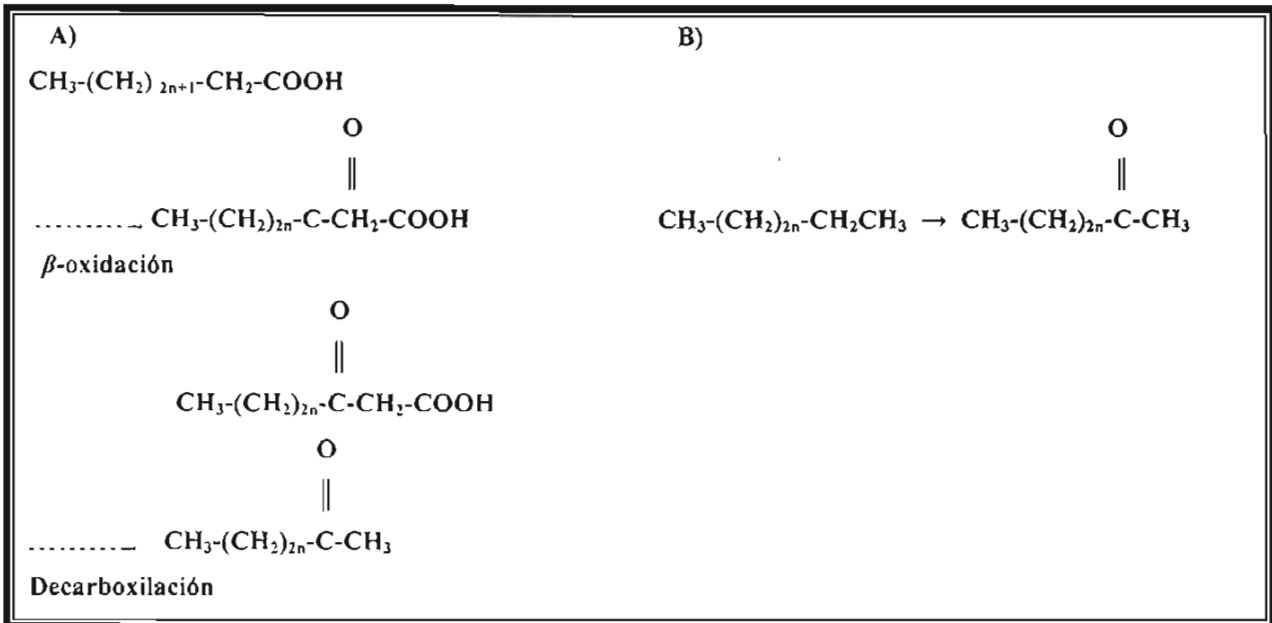


Figura 7. Formación de *n*-metilcetonas en el suelo, a través de la β -oxidación microbiana de: A) *n*-ácidos grasos y B) *n*-alcanos (De: Amblès *et al.*, 1993).

En contraste, las cetonas triterpénicas pentacíclicas derivan del metabolismo de plantas superiores, debido a que se logró detectar la presencia del grupo cetónico en Spodosoles hidromórficos forestales y establecer el dominio de cetonas triterpénicas de origen vegetal (Amblès *et al.*, 1993).

En una investigación sobre los lípidos del suelo bajo diferentes cultivos agrícolas (*Saccharum officinarum*, *Oryza sativa*, *Musa paradisiaca*, *Ananas comosus*) se demostró que en la mayoría de los materiales estudiados, los ácidos grasos libres fueron encontrados en mayor cantidad y

variedad, que los ácidos grasos ligados al grupo de los triacilglicéridos. Finalmente los *n*-ácidos grasos dominantes fueron el mirístico (C₁₄), palmítico (C₁₆), esteárico (C₁₈), oléico (C_{18:1}) y araquídico (C₂₀) (Wang, *et al.*, 1971).

Con el fin de estimar diferencias en el manejo del suelo, se establecieron los patrones de ácidos grasos que constituyen a los fosfolípidos y lipopolisacáridos de la biomasa microbiana. Los suelos con rotación y los cultivados con trigo, mostraron mayor proporción de ácidos grasos, mientras que en los suelos bajo pastizal dominaron los hidroxiaácidos grasos. En contraste, en suelos sin cubierta vegetal y cultivos monoespecíficos se observaron las concentraciones más bajas de ambos tipos de compuestos (Zelles y Bai, 1993).

La descripción de biomarcadores lipídicos en formaciones monoespecíficas de *Pinus pinea*, *Quercus rotundifolia* y *Juniperus thurifera*, indicaron diferencias entre los ecosistemas y en la intensidad del recambio de la MOS. La distribución de *n*-alcanos mostró la mayor variación, en suelos bajo *Q. rotundifolia*. El patrón de *n*-ácidos que coincidió tanto en suelos como en plantas, se estableció en el bosque de *J. thurifera*. En ambos tipos de muestras se identificaron más de 60 compuestos cíclicos (monoterpenos, diterpenos, sesquiterpenos) (Almendros *et al.*, 1996).

En la Cuenca del Río Orinoco, Venezuela se logró establecer la distribución molecular de lípidos en ambientes hidromórficos. Los compuestos químicos del suelo evidenciaron la formación de microambientes anaeróbicos, lo cual se basó en la presencia de anillos A, degradados, pertenecientes a los triterpenos de plantas superiores, además de productos de degradación anaeróbica como son los 3-oxi-triterpenos. La distribución molecular de *n*-alcanos, *n*-alcanoles, *n*-ácidos grasos y esteroides, reflejó el origen de la MOS a partir de plantas vasculares y microorganismos (Jaffé *et al.*, 1996).

2. Dinámica de los lípidos en el suelo

2.1. Origen y distribución

La mayor parte del material lipídico de los suelos, resulta de la descomposición parcial de residuos vegetales, animales y microbianos (Braids y Miller, 1975).

Los lípidos del suelo pueden constituir de 4 a 8 g kg⁻¹ de C orgánico en suelos minerales; en contraste, se han reportado cantidades tan altas como 42 g kg⁻¹ en suelos orgánicos (Stoot y Martin, 1990).

El nitrógeno, fósforo y azufre pueden coexistir en biomoléculas del tipo de los aminoácidos, ácidos nucleicos, fosfolípidos, así como en los sulfolípidos, por lo que pueden considerarse fuentes importantes de nutrientes para las comunidades microbianas y para el desarrollo vegetal. Los fosfolípidos representan una fuente considerable de nitrógeno, cuando se encuentran esterificados con alcoholes nitrogenados (colina, etanolamina o serina) (Kowalenko, 1978).

El fraccionamiento del P orgánico, indica que el suelo está constituido por 45 g kg⁻¹ de fosfatos de inositol, 32 g kg⁻¹ en forma de hexafosfato de inositol y como caso particular 1 g kg⁻¹ de fosfolípidos.

Los valores reportados para cinco suelos en Inglaterra, varían de 0.6 a 14.5 mg kg⁻¹, enriquecidos a la vez por la fosfatidilcolina en proporciones de 40 g kg⁻¹ y fosfatidiletanolamina en 30 g kg⁻¹ los cuales coinciden con los más abundantes en la vegetación (Stevenson, 1994). Por otra parte, el marcador molecular de la fosfatidilcolina comprobó que existe una rápida incorporación de los fosfolípidos al suelo (Tunlid y White, 1992).

Las ceras protectoras en tejidos vegetales y animales (en hojas, acículas, troncos, frutos, piel, pelo, plumas y exoesqueletos) son particularmente resistentes a la descomposición, por lo que se ha reportado que pueden permanecer por largos periodos geológicos en sedimentos con cambios mínimos.

Las esporas de los hongos están constituidas con material repelente al agua (1.4 a 1.8 g kg⁻¹ de ceras) su principal función es evitar la desecación durante la dispersión en el aire, al mismo tiempo que son impermeables a los compuestos tóxicos (Fisher *et al.*, 1972) y como contraste la estructura celular total de los hongos pueden llegar a alcanzar de 10 a 25 g kg⁻¹ de ceras. Los ácidos grasos que forman parte de las ceras, están constituidos principalmente por una cadena lineal saturada y con número par, con predominio de los ácidos palmítico (C₁₆), esteárico (C₁₈) y mirístico (C₁₄).

La vegetación no sólo contribuye favorablemente al aporte de compuestos lipídicos, sino también permite el desarrollo de poblaciones microbianas específicas, que modifican la composición química de los mismos, junto con reacciones de óxido-reducción dependientes de los factores abióticos (Tan, 1986).

Las bacterias como promedio contienen de 5 a 10 g kg⁻¹ en su estructura celular, con excepción de los géneros *Azotobacter sp.* y *Mycobacterium sp.*, que llegan a alcanzar de 2 a 40 g kg⁻¹ (Stevenson, 1994).

Los insectos representan otro grupo importante que aporta lípidos al suelo, debido a su amplia relación superficie/volumen; por ejemplo, en blátidos se ha determinado que su cutícula está constituida por triacilglicéridos y ácidos grasos, los cuales constituyen el 90 % de los lípidos totales. Al mismo tiempo, los gasterópodos aportan entre 60 al 70 g kg⁻¹; en cambio las

lombrices pueden contener de 2.3 a 10 g kg⁻¹ de ácidos grasos, aunque también existen registros de 16 g kg⁻¹ (Dinel *et al.*, 1990).

En algunas investigaciones realizadas en ambientes naturales y agrícolas de Vietnam del Norte, se reportaron extractos lipídicos en rangos de 0.06 g kg⁻¹ (en suelos bajo praderas) a 3.24 g kg⁻¹ (bosque templado), a diferencia de los suelos inundados, cultivados con arroz de 0.03 g kg⁻¹ (suelos aluviales neutros) a 0.32 g kg⁻¹ (turbas) (Dinel *et al.*, 1988). En treinta y cinco suelos de Rusia, el contenido de lípidos, varió de 0.06 a 1.40 g kg⁻¹, como caso particular en los suelos de tundra se detectaron niveles de 0.6 g kg⁻¹, mientras que en suelos pardos de los niveles fueron de 0.06 g kg⁻¹ (Fridland, 1982). En la región de Pisa, Italia fueron registrados contenidos menores, entre 0.048 a 0.17 g kg⁻¹ (Galoppini y Riffaldi, 1969).

Al estudiar los horizontes Ah en suelos representativos de British Columbia (Canadá), se registraron valores promedios de lípidos entre 0.24 g kg⁻¹ (en Gleysol húmico) a 1.30 g kg⁻¹ (en pastizales subalpinos) y en relación a los horizontes F y H, se presentaron rangos de 1.61 a 5.23 g kg⁻¹ (Chae y Lowe, 1981).

A partir de la técnica degradativa de ácidos húmicos (en medio ácido con persulfato de potasio y medio alcalino con permanganato de potasio), se logró demostrar que una fracción considerable de las sustancias húmicas está constituida por compuestos orgánicos hidrófobos, dentro de los que se identificaron a los *n*-alcanos (C₁₅-C₃₄), *n*-ácidos grasos, *n*-alcoholes (C₁₈-C₃₅), dioles C₁₆, C₂₄, C₃₁, C₃₂; esteroides (C₂₇-C₂₉), *n*-alquil monoésteres diéster C₅₆-C₇₉, *n*-alquil triéster C₇₅-C₉₄, los anteriores compuestos se relacionan con la continua transformación microbiana (González-Vila *et al.*, 1984; Schnitzer, 1991).

2.2 Factores que influyen en su composición

Los mayores contenidos de lípidos se concentran principalmente en los primeros centímetros del perfil, coincidiendo así con la mayoría de los procesos biológicos que se desarrollan en el suelo.

Algunas investigaciones han demostrado que los factores abióticos del suelo, que más afectan la distribución de los lípidos son el pH y la anaerobiosis. Con base en un estudio sobre distribución de lípidos en una catena de suelos localizada en un bosque templado, se observaron que los valores de pH de 7.9 a 3.5 correspondieron a incrementos de lípidos, en función a la acidez, en el rango de 0.40 a 1.6 g kg⁻¹ respectivamente (Jambu *et al.*, 1978).

Asimismo, en suelos bajo cubierta de *Sphagnum*, con pH de 3.3 a 4.3, se registraron niveles entre 10 a 20 g kg⁻¹ y en contraste, en suelos aluviales de Florida con pH de 7.1 a 7.5, fueron reportados valores de 1 a 2 g kg⁻¹ (Dinel *et al.*, 1990).

El grupo de los esteroides puede acumularse significativamente en los Spodosoles, cuando se cumplen los siguientes requerimientos: sitios bien drenados, pobres en calcio, pH ácidos, vegetación de coníferas y humus del tipo *mor*. En contraste, los Mollisoles que se han desarrollado en condiciones con drenaje moderado, bosques decíduos, pH de neutro a básico, ricos en calcio y por tanto con humus del tipo mull, los ácidos grasos, ceras y resinas llegaron a registrarse en niveles bajos (Stevenson, 1994).

Al mismo tiempo se ha reportado que las condiciones anaeróbicas de los suelos reducen la descomposición de los materiales lipídicos (Braids y Miller, 1975).

Además de los factores abióticos, las relaciones de descomposición de los grupos moleculares, regulan la dominancia de ciertos compuestos, este es el caso de los alcoholes, parafinas y ceras, que normalmente son compuestos resistentes a la biodegradación microbiana, ya que

logran permanecer por largos períodos en el suelo, y a diferencia de los ácidos grasos y fosfolípidos, son considerados como más lábiles (Stevenson, 1994).

3. Importancia de los lípidos en el suelo

Dentro de la diversidad de compuestos que se han detectado en suelos arcillosos y poco aireados, algunos pueden presentar efectos tóxicos. Específicamente el ácido dihidroxiesteárico $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CHOHCHOH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$, en concentraciones de 10–50 ppm es capaz de inhibir la germinación del trigo y en plantas superiores reducir la respiración, interfiriendo en el metabolismo oxidativo de las raíces (Stevenson, 1994).

El ácido β -metil tetradecanoico sintetizado en el suelo por *Myxococcus xanthus*, puede inhibir el desarrollo de *Fusarium conidia*; por lo que esta especie posiblemente podría ser utilizada como controlador de determinados patógenos (Li, 1978).

Cuando los lípidos se encuentran por arriba de 20 g kg^{-1} del contenido de la MOS, llegan a modificar algunas propiedades físicas del suelo, como es la capacidad de retención de humedad, ya que pueden provocar repelencia de las partículas del suelo, disminuyendo la humedad disponible para los organismos y por lo tanto originando condiciones de estrés (Amblès *et al.*, 1983).

Al mismo tiempo, algunas investigaciones han demostrado que los ácidos grasos (lípidos polares) favorecen la estabilidad de los agregados, ya que estas moléculas pueden incorporarse en forma de láminas orientadas a nivel de poros o interagregados. Los agregados que se someten a humedecimiento, tienen la propiedad de resistir la compresión del aire que queda atrapado en los poros.

En un estudio sobre la aplicación del ácido esteárico (C_{18}) y oleico ($C_{18:1}$), se demostró que los compuestos insaturados fueron más eficientes como estabilizadores de la estructura, debido a los enlaces eténicos ($CH_2=CH_2$) que refuerzan la polaridad de la cadena. En una segunda fase del experimento se comparó la acción del ácido esteárico (C_{18}) y el montánico (C_{28}) y a partir de los resultados se logró demostrar que el ácido con mayor número de carbonos originó la mejor diferencia significativa en la estabilidad de agregados, como resultado del elevado carácter hidrofóbico (Jambu *et al.*, 1983; Millar *et al.*, 1979).

Un exceso de lípidos en el suelo origina la impermeabilización en las partículas, con limitaciones en la solubilidad de algunos nutrientes. Para contrarrestar este efecto en suelos ácidos y arenosos (Spodosoles), se utilizaron a nivel de laboratorio arcillas como agentes detoxificantes, con base en su capacidad catalítica de degradar compuestos orgánicos. En el experimento se incubaron suelos con bentonitas y caolinitas, durante 16 semanas. Al fraccionar los lípidos en libres y ligados, se observó que existía una disminución selectiva de monoácidos libres. A su vez, con la bentonita se incrementó la transesterificación de ácidos grasos libres a la fracción ligada (arcilla-humus). En cambio, con la caolinita se favoreció la degradación de ácidos grasos, cetoácidos e hidroxiácidos, donde los de cadena corta resultaron los más lábiles (Ziegler, 1989).

Otro aspecto que debe resaltarse en las macromoléculas lipídicas, es su capacidad de crear condiciones adecuadas en reacciones de condensación química o biológica, a partir de grupos funcionales oxigenados, además de uniones poliinsaturadas, las cuales crean sitios adecuados de reacciones de condensación química o biológica. Asimismo, cuando la matriz macromolecular se convierte en una estructura más compleja pueden existir incorporaciones

adicionales de compuestos no funcionalizados (tanto hidrocarburos lineales como cíclicos) a través de fenómenos como la oclusión física (Almendros *et al.*, 1991; 1996; 2001).

La principal hipótesis sobre la formación de sustancias húmicas involucra la biodegradación de biomacromoléculas como la lignina y celulosa, seguida por la policondensación de metabolitos microbianos solubles en agua (fenoles, aminoácidos y azúcares) dentro de una red insoluble de alto peso molecular; aumentando su estabilidad cuando se complejan con materiales inorgánicos del suelo. Aunque, la estructura molecular exacta de las sustancias húmicas no se ha logrado conocer en su totalidad, a partir de los productos de pirólisis de los ácidos húmicos se han propuesto recientemente otros mecanismos para explicar la humificación, en presencia de series de *n*-alcanos, esteroides, isoprenoides, hopanoides y biopolímeros alifáticos. Se ha propuesto que estos compuestos pueden considerarse como algunos de los precursores de las sustancias húmicas, los cuales podrían permanecer atrapados dentro de la red orgánica del humus. La estabilidad de las sustancias aumenta con la retención de los componentes lipídicos en donde se involucran tres mecanismos: a) preservación selectiva de biopolímeros resistentes de cadena lineal; b) aislamiento físico de lípidos por encapsulación molecular; c) incorporación química por enlaces covalentes entre biomarcadores y sustancias húmicas (Lichtfouse *et al.*, 1998b).

4. Lípidos ligados a la fracción órgano-mineral

Es importante mencionar que un nivel significativo de lípidos se encuentra asociado a la matriz del suelo (arcilla-humus), por lo que es conveniente establecer las condiciones que favorecen estas asociaciones.

Los edafólogos fueron tal vez los primeros en reconocer la importancia de la asociación que existe entre materiales orgánicos y arcillas, a nivel de estabilidad y resistencia de la materia orgánica en el suelo (Theng, 1974). A su vez, estas asociaciones logran actuar sobre otras propiedades del suelo, en donde resalta la captación de agua, fijación de metales, estabilización de agregados y sorción de compuestos orgánicos, incluyendo los xenobióticos.

Los avances metodológicos en determinadas técnicas espectroscópicas, como es la de infrarrojo, han permitido progresar en el conocimiento de los procesos de formación de complejos arcillo-orgánicos, de tal forma que, junto con la difracción de rayos-X, proporcionan información sobre los enlaces y disposición de los compuestos orgánicos en la superficie de las arcillas. La interacción de las arcillas con los compuestos orgánicos puede ocurrir con macromoléculas orgánicas (humus) y con moléculas orgánicas de bajo peso molecular (alcoholes, cetonas, aldehídos, aminas, amidas, aminoácidos, ácidos grasos y sacáridos entre otros) (Theng, 1974).

Los métodos de fraccionamiento y dispersión de las partículas con ultrasonido, han demostrado que entre 50 a 100 g kg⁻¹ de la MOS en el suelo está íntimamente asociada a complejos órgano-minerales y particularmente con la fracción arcilla. Anderson *et al.*, (1981) encontraron que 96 g kg⁻¹ del carbono orgánico y 93 g kg⁻¹ del nitrógeno orgánico permanecen asociados con partículas minerales. Se ha visto que los niveles de asociación están relacionados con el tamaño de las partículas, en donde la más significativa correspondió a la

interacción con las arcillas. Reyes (1997) investigó la fracción órgano-mineral de suelos antrópicos de Xochimilco y comprobó que la mayor retención de carbono y nitrógeno se asocia a las fracciones más finas (limos y arcillas).

Los sitios de intercambio en los complejos órgano-minerales son capaces de ligar tanto macro- como micronutrientes y evitar que estos sean perdidos o lixiviados, y favorecer su liberación de manera paulatina, por lo que los complejos órgano-minerales representan un reservorio importante de nutrientes (Haider y Huang, 1994).

Las moléculas de ácidos grasos están asociadas a las arcillas a partir de sus grupos carboxilos a los oxígenos de las superficies de silicatos, mediante enlaces de van der Waals y enlaces O-H...O-Si (Theng, 1974).

Por medio de los tratamientos de suelos con ácido fluorhídrico y su extracción posterior con solventes no polares, se observó un incremento en los fosfolípidos, indicando que estos compuestos llegan a permanecer estables en los minerales arcillosos (Kowalenko, 1978).

Al mismo tiempo, se ha establecido que la biodegradación de los lipopolisacáridos se reduce notablemente, cuando existen interacciones con minerales arcillosos, y con iones metálicos del suelo (Tan, 1986). Los lípidos resultan ser altamente resistentes cuando forman enlaces con el hierro, aluminio y aluminosilicatos (Moucawi *et al.*, 1981).

Las sustancias húmicas del suelo adquieren un papel estabilizador y adsorbente de los ácidos grasos a nivel de superficie o en poros por largos periodos ya que, por ejemplo, participan de manera importante en el transporte o sedimentación de contaminantes derivados del petróleo (Schnitzer, 1978).

Por otra parte, perturbaciones ambientales como son los incendios forestales, que aumentan la temperatura en los suelos inciden en el incremento de las interacciones entre las sustancias

húmicas y los compuestos hidrofóbicos, así como con los que se encuentran ligados, aumentando significativamente su estabilidad (Almendros *et al.*, 1988).

Los monoterpenos en su mayoría son compuestos volátiles, sin embargo han podido detectarse en concentraciones traza, lo que sugiere que muchos de ellos quedan atrapados o ligados físicamente en la matriz órgano-mineral del suelo (Almendros *et al.*, 1996).

Los lípidos ligados a la fracción mineral o húmica probablemente son menos susceptibles a transformaciones microbianas, por lo que favorecen la estabilidad de los compuestos orgánicos, que permanecen inaccesibles tanto para los microorganismos como para las enzimas extracelulares (Klok *et al.*, 1988; Schnitzer, 1991).

Las interacciones de las sustancias húmicas con los alcanos, esteroides, isoprenoides, hopanoides y biopolímeros alifáticos tienen lugar por medio de los siguientes mecanismos: *a*) retención física de moléculas apolares de cadena corta, las cuales pueden permanecer encapsuladas dentro de la matriz orgánica, ejerciendo interacciones débiles tales como fuerzas de van der Waals; *b*) mediante el aislamiento químico, debido a enlaces fuertes de tipo éster y éter, con biomarcadores como el fitol y esteroides entre otros. Las moléculas sólo pueden extraerse a partir de tratamientos drásticos, como por ejemplo hidrólisis alcalina o pirólisis; *c*) preservación selectiva de cadenas lineales de polímeros microbianos que adquieren resistencia a la degradación química y biológica, su origen microbiano se estimó con análisis de ^{13}C (Figura 8) (Lichtfouse *et al.*, 1998 *a, b*).

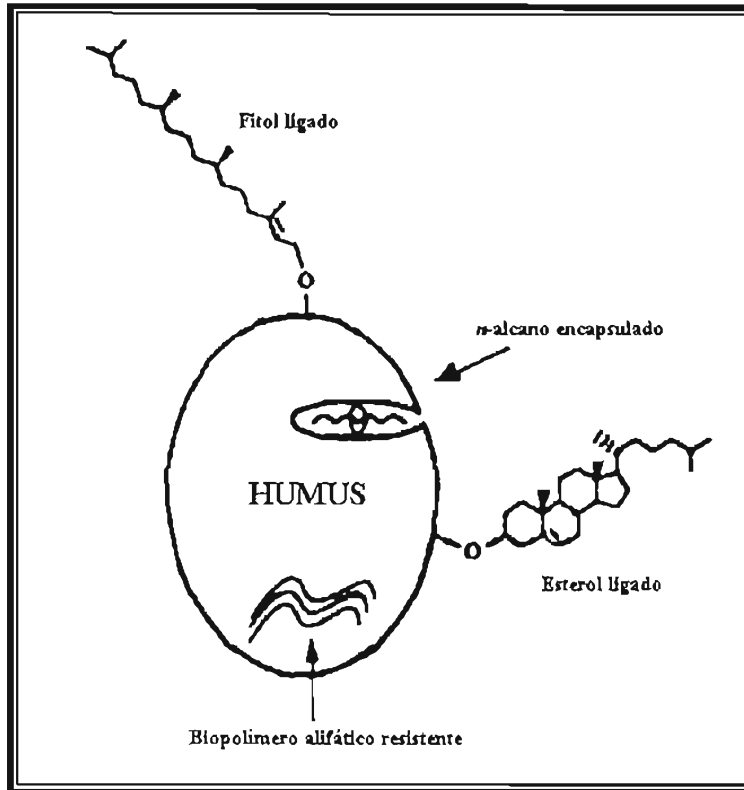


Figura 8. Representación esquemática de la estabilización de la fracción húmica del suelo, a partir de la encapsulación de pequeñas moléculas apolares (aislamiento físico), o por enlaces con biomarcadores funcionalizados (aislamiento químico) o preservación selectiva de biopolímeros alifáticos (De: Lichtfouse *et al.*, 1998 b).

5. Metodologías de extracción de lípidos.

Se define como extracción al proceso de separación en muestras sólidas, en donde los analitos (solutos) pasan a la fase extractante, la cual puede ser un disolvente o un fluido en estado supercrítico. La extracción puede auxiliarse con energía térmica, mecánica (agitación tradicional o ultrasónica) o eléctrica y favorecer así la cinética del proceso de separación sólido-líquido.

Los métodos de extracción a escala analítica se clasifican en: discontinuo, continuo y Fluido

Supercrítico (FS). El FS como fase extractiva permanente toma contacto con la superficie y el interior de la matriz, favoreciendo el proceso de separación. Los FS, que se definen como gases densos con poder disolvente controlable, alcanzando densidades de un líquido ($0.1-1.0 \text{ g cm}^{-3}$), o bien como una forma de la materia en la que el estado líquido y gaseoso son indistinguibles entre sí. La región de temperatura y presión en donde una sustancia pura existe como una fase única (sólido, líquido o gas), está limitada por las curvas de coexistencia sólido-gas, sólido-líquido y líquido-gas, correspondientes a su vez a los equilibrios de sublimación, fusión y vaporización respectivamente.

En el método discontinuo, la muestra sólida se introduce en un recipiente que contiene la fase extractiva donde se sumerge. Lo más frecuente es que el recipiente esté abierto y provisto de un sistema de condensación para evitar las pérdidas de disolvente por vaporización. El sistema de calefacción provoca incrementos de presión y temperatura que favorecen la separación. Un aspecto técnico desfavorable es la necesidad de separar las fases una vez finalizada la lixiviación, que se complica cuando es necesario recoger toda la fase extractante.

Con el continuo se alcanzan rendimientos cercanos al 100 %, considerado dentro del Sistema de Referencia Internacional EPA; para este método se requiere de un extractor tipo Soxhlet en donde la muestra se coloca en un cartucho de papel filtro o de lana de vidrio y la solución extractante se deposita paulatinamente, mediante la condensación de vapor procedente del matraz de destilación. Cuando el líquido llega a un determinado nivel, un sifón lo envía rápidamente al matraz de destilación, donde los analitos se concentran. La ventaja principal radica en que la muestra está continuamente en contacto con porciones frescas del disolvente, sin aumentar el volumen del mismo, favoreciendo el desplazamiento del equilibrio de separación. Las extracciones de grasas en alimentos, suelos y en filtros para contaminantes

medioambientales, son algunas de sus aplicaciones principales (Figura 9).

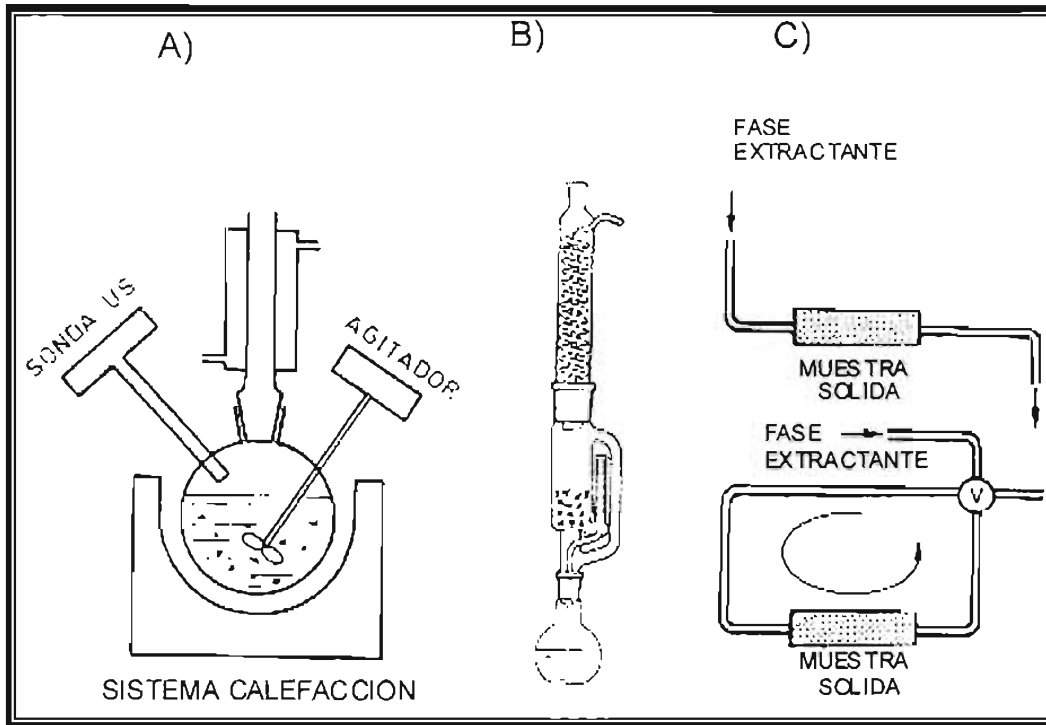


Figura 9. Sistemas de operación más usuales de llevar a cabo la lixiviación a escala analítica. A) Discontinuo, B) Continuo (Soxhlet), C) Fluido supercrítico sin y con recirculación (De: Luque *et al.*, 1993).

Normalmente las curvas se cortan en un punto triple (Pt) que corresponde al equilibrio entre las tres fases, en ausencia de influencias externas la fase sólida y líquida, puede coexistir indefinidamente estableciendo un equilibrio en el estado de fusión. En el equilibrio líquido-gas (vaporización) la curva de coexistencia, se interrumpe bruscamente en un punto, denominado punto crítico (Pc), el cual se define por una temperatura crítica (Tc) y por una presión crítica (Pc) (Figura 10).

Existen dos vías para llegar al mismo estado supercrítico: a) empezar en un punto de la región

líquida, aumentar la presión por encima del P_c y a la vez elevar la temperatura al valor crítico o bien b) empezar en la zona de vapor y calentar el gas por encima de su T_c aumentando a continuación la presión por arriba de su P_c .

Los FS adquieren propiedades disolventes que se reflejan en el incremento de su densidad, presentan alta difusividad de solutos y viscosidad baja, por tanto, en la extracción sus propiedades favorecen una transferencia más eficiente. Las extracciones cuantitativas con FS generalmente se completan entre 10 a 60 min, mientras que por métodos convencionales, pueden realizarse desde horas hasta días.

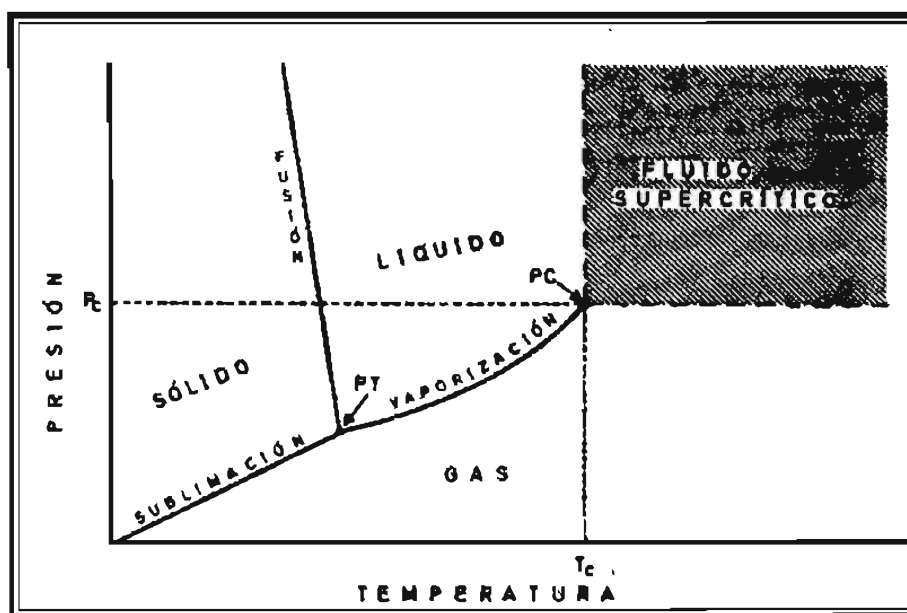


Figura 10. Diagrama de fases sólido/líquido/gas/fluido supercrítico. PT: punto triple; PC: punto crítico; P_c : presión crítica; T_c : temperatura crítica (De: Luque *et al.*, 1993).

Partiendo de una muestra, la extracción con FS facilita la extracción de compuestos con una gama de polaridades, modificándose únicamente la presión. Así, cuando se utilizan presiones elevadas, se liberaran los más polares y los de alto peso molecular.

El CO₂ y el N₂O en estado supercrítico requieren de temperaturas críticas relativamente bajas, por lo que son ideales para la extracción de compuestos térmicamente inestables. La principal limitación del CO₂ radica en la baja extracción de compuestos polares que, sin embargo, puede atenuarse con la adición de modificadores polares (Tabla 2).

Tabla 2. Características de Fluidos Supercríticos representativos
(De: Hawthorne, 1990).

Fluido	Tc °C	Pc atm	Parámetro de solubilidad*
CO ₂	31	73	10.7
N ₂ O	36	72	10.6
NH ₃	132	112	13.2
MeOH	240	78	14.4
CClF ₃	29	38	7.8
Etano	32	48	6.6
Etileno	10	51	6.6

*Parámetro de solubilidad de Hilderbrand (cal cm⁻³).

Con la adición de modificadores a los FS se logra mejorar y ampliar su campo de aplicación, actuando sobre la solubilidad, solvatación e interacción de los analitos con los sitios activos de la matriz. El efecto modificador se define como el aumento que experimenta la solubilidad de un soluto cuando se añade una cantidad pequeña de otro disolvente al FS.

Los modificadores pueden incorporarse como mezclas a los fluidos en el sistema de bombeo, con la ayuda de una segunda bomba (estado dinámico), o simplemente depositando el modificador como un líquido a la muestra antes de iniciar la extracción (estado estático); el tiempo de extracción puede disminuir de un 70 a 90% (Ander y Sonnessa, 1982; Capriel *et al.*, 1990; Luque *et al.*, 1993; Hawthorne, 1990; Schnitzer, 1990).

Dentro de los primeros estudios sobre la aplicación de FS a nivel analítico sobresalen los de Hawthorne y Miller (1986 y 1987), los cuales hacen referencia a la utilización del $\text{CH}_3\text{-CH}_3$, N_2O y de CO_2 , así como el CH_3OH en diferentes concentraciones. A partir de algunos materiales de referencia certificados (Residuos sólidos urbanos saturados con hidrocarburos aromáticos policíclicos) se lograron recuperaciones cuantitativas de diferentes compuestos en tan sólo 30 minutos. El sistema Soxhlet se utilizó como método de referencia y el diclorometano o benceno, como agentes extractantes. La recuperación de analitos se consiguió en 8 horas y cuando la muestra se sometió a ultrasonido el tiempo disminuyó a 4 horas. El $\text{CH}_3\text{-CH}_3$ y el CO_2 supercríticos resultaron los menos eficientes para la extracción de HAP, mientras que la recuperación con el N_2O resultó la más significativa. La adición del CH_3OH como modificador, originó una mejor eficiencia de extracción tanto con el CO_2 como el N_2O ; los resultados demostraron que la extracción con FS puede considerarse un método cuantitativo, rápido e ideal en muestras sólidas de interés ambiental.

III. OBJETIVOS.

1. General

Investigar el extracto lipídico total en suelos de algunos agroecosistemas de México.

2. Particulares

- Determinar los patrones de distribución de los extractos lipídicos, a lo largo de perfiles de suelos con diferentes agroecosistemas.

- Analizar el extracto lipídico libre de los suelos superficiales.

- Caracterizar el tipo de humus y naturaleza de la fracción mineral en relación con el extracto lipídico en los suelos muestreados.

- Comparar los métodos de extracción de lípidos en el suelo mediante el sistema Soxhlet y el de fluidos supercríticos.

3. Hipótesis

La evolución de la materia orgánica del suelo (MOS) depende del régimen de humedad, la temperatura, altitud, topografía, la fracción fina del suelo, los electrolitos, la actividad microbiana y de los aportes de la vegetación circundante. Así, dado que el extracto lipídico es una fracción de la MOS, su contenido y composición en el suelo dependerá, en su mayor parte, de la calidad y cantidad de MO. Por lo tanto se espera que existan diferencias con el tipo de cultivo predominante (anual o perenne) en los diferentes agroecosistemas.

IV. MATERIALES Y METODO.

1. Campo

Con el fin de conocer si la fracción lipídica es diferente en suelos con distinto desarrollo y manejo agrícola, se seleccionaron suelos bajo cultivos con altos contenidos de lípidos, como lo reportan estudios previos en De Chávez, *et al.*, 1992. Para los cultivos perennes, se seleccionaron parcelas en las que el cultivo superara los 30 años y por lo tanto se tiene posibilidad de manifestar diferencias en la concentración y composición de los lípidos en el suelo.

A continuación se indican los sitios de muestreo, así como los cultivos correspondientes que sostienen:

- Calicata 1, suelos antrópicos - *Zea mays* L.
- Calicata 2, suelos antrópicos - *Brassica oleracea* var. *cauliflora* L.
- Perfil 1, Andisol - *Coffea arabica* L.
- Perfil 2, Entisol - *Sesamum indicum* L.
- Perfil 3, Entisol - *Arachis hypogea* L.
- Perfil 4, Entisol- *Cocos nucifera* L.
- Perfil 5, Inceptisol - *Theobroma cacao* L.
- Perfil 6, Inceptisol - *Cynodon spp* L.
- Perfil 7, Inceptisol - *Theobroma cacao* L.
- Perfil 8, Andisol - *Persea americana* Mill.
- Perfil 9, Andisol - *Brassica oleracea* var. *cauliflora* L..

Tabla 3. Descripción de los factores formadores de suelo en los sitios de muestreo.

Entidad Federativa	Sitios	Localización	Clima	Temperatura Precipitación	Geología	Material parental
Distrito Federal	Xochimilco Calicata 1	19° 16' y 99° 02'	templado sub-húmedo	16 °C/ 737 mm	cuaternario	aluvial
	Tláhuac Calicata 2	19° 13' y 98° 02'	templado sub-húmedo	14 °C/ 671 mm	cuaternario	aluvial
Guerrero	La Pintada, Atoyac de Alvarez, Perfil 1	17° 21' y 100° 10'	semicálido húmedo	17 °C/ 1704 mm	cuaternario	granodiorita
	Tepecoacuilco de Trujano Perfil 2 / Perfil 3	18° 17' y 99° 28'	cálido subhúmedo	26 °C/ 1015 mm	terciario	lutitas/ fluvial
	Coyuca de Benítez Perfil 4	17° 00' y 100° 05'	cálido subhúmedo	26 °C/ 1102 mm	cenozoico inferior	aluvial
Tabasco	Cunduacán Perfil 5	18° 08' y 93° 16'	cálido húmedo	27 °C/ 2125 mm	cretácico superior	fluvial
	Puyacatengo Perfil 6 y Perfil 7	17° 32' y 92° 56'	cálido húmedo	26 °C/ 3593 mm	cretácico superior	fluvial
Michoacán	Tanaquillo, Chilchota Perfil 8	19° 51' y 102° 01'	semicálido subhúmedo	18 °C/1034 mm	cenozoico superior	fluvial
	Valle de Tangancicuaro Perfil 9	19° 54' y 102° 11'	semicálido subhúmedo	17 °C/ 1894 mm	cenozoico superior	fluvial

Tabla 3. Descripción de los factores formadores de suelo en los sitios de muestreo (continuación...)

Sitios	Suelo Orden	Relieve	Pendiente	Altitud msnm	Vegetación	Uso actual
Xochimilco Calicata 1	antrópico	plano	5%	2200	acuática y sub-acuática	agricultura de temporal y riego (maíz)
Tláhuac Calicata 2	antrópico	plano	3%	2240	acuática y sub-acuática	agricultura de temporal (brócoli)
La Pintada, Atoyac de Alvarez (Perfil 1)	Andisol	regular	14%	1300	bosque mesófilo de montaña	cafetal
Tepecoacuilco de Trujano Perfil 2 / Perfil 3	Entisol	plano	5% / 8%	910/925	bosque caducifolio	agricultura de temporal ajonjolí/cacahuate
Coyuca de Benítez Perfil 4	Entisol	plano	4%	150	bosque tropical caducifolio	coco
Cunduacán Perfil 5	Inceptisol	plano	5%	30	bosque tropical perennifolio	cacaotal
Puyacatengo Perfil 6 y Perfil 7	Inceptisol	plano	7%	60	bosque tropical perennifolio	pastizal/cacaotal
1. Tanaquillo, Chilchota Perfil 8	Andisol	plano	7%	1800	bosque-encino	huerto de aguacate
2. Valle de Tangancicuaro Perfil 9	Andisol/vertisol	plano	5%	1700	matorral subtropical	agricultura de temporal y riego (brócoli)

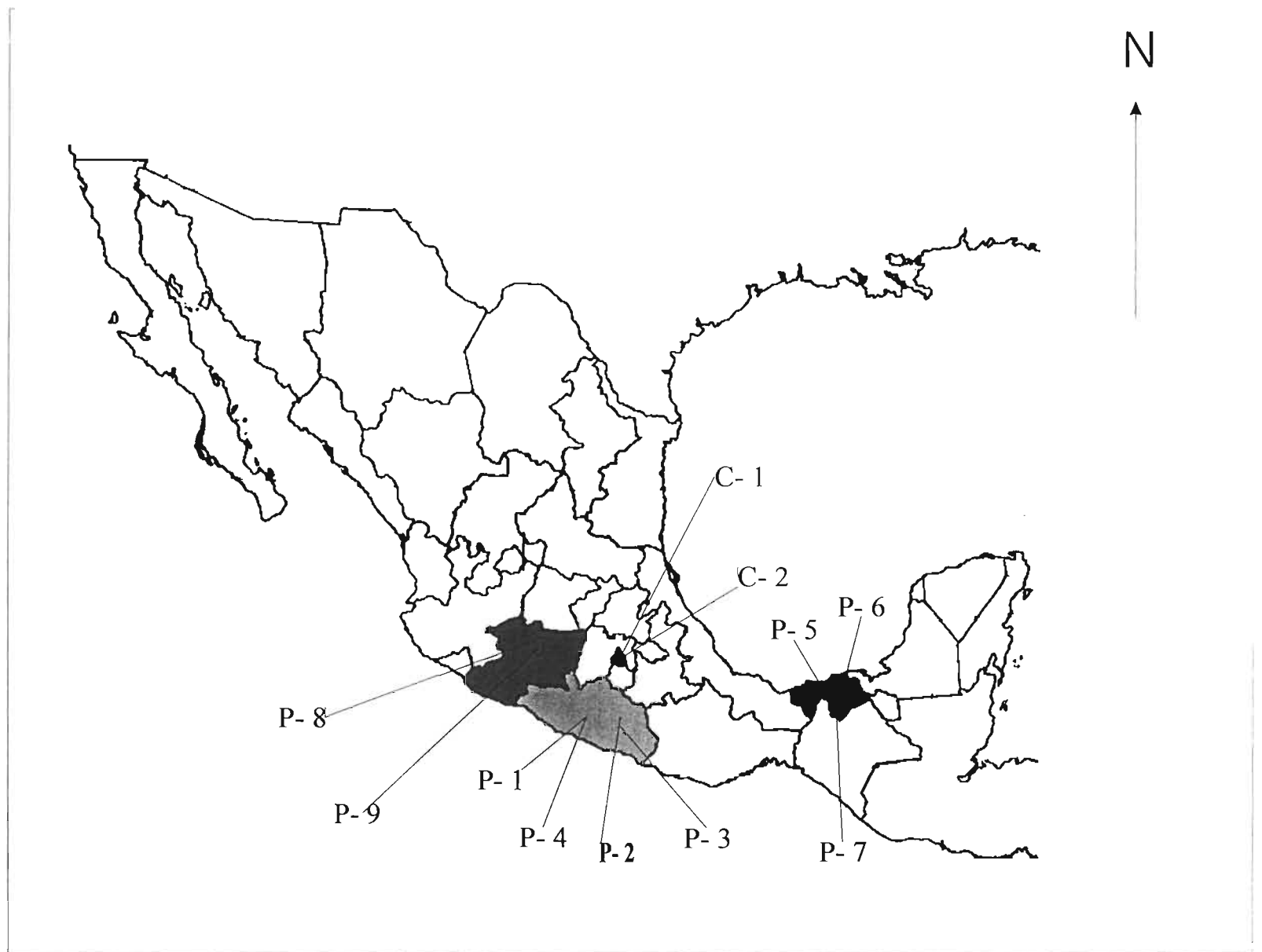


Figura 11. Localización de los sitios de muestreo (P=perfil y C= calicata).

En la Figura 11, se localizan los sitios de muestreo a nivel estatal y en la Tabla 3, se resumen parte de los factores externos que determinan los procesos edafogénicos de las zonas de muestreo.

Las muestras se recogieron cada 10 cm de profundidad, se desecaron a temperatura ambiente y se tamizaron a través de una malla con abertura de 2.0 mm, para garantizar su homogeneización. La profundidad del muestreo en los perfiles fue determinada por el nivel freático o por el contacto con el material parental, por lo que las profundidades del muestreo variaron en cada caso, como puede observarse a continuación:

Calicata 1, 110 cm

Calicata 2, 180 cm

Perfil 1, 150 cm

Perfil 2, 30 cm

Perfil 3, 150 cm

Perfil 4, 150 cm

Perfil 5, 110 cm

Perfil 6, 70 cm

Perfil 7, 120 cm

Perfil 8, 170 cm

Perfil 9, 130 cm.

En el Apéndice I se detalla la descripción de campo de los perfiles, así como su clasificación, fundamentada en la Soil Taxonomy (1999).

2. Tratamiento de las muestras en el laboratorio

Para lograr la caracterización y apoyar la clasificación de los perfiles, se realizaron los análisis físicos y químicos, con base en las siguientes metodologías:

2.1. Suelos

a. Análisis físicos

- Color en seco y húmedo. Por comparación con las cartas de color Munsell (1975).
- Densidad aparente. Por el método de la probeta (Baver, 1956).
- Densidad real. Por el método del picnómetro (Baver, 1956).
- Porcentaje de porosidad. Por la relación del cociente de densidad aparente y real.
- Textura. Por el método del hidrómetro de Bouyoucos (1961).

b. Análisis químicos.

- Reacción del suelo (pH): Por el método del potenciómetro, en relación (1:2.5, 1:5 y 1:10) suelo-agua destilada y suelo-solución salina en KCl 1 M pH 7, en potenciómetro Corning modelo 7.
- Materia orgánica. Por el método de Walkley y Black, modificado por Walkley, 1947 (Jackson, 1982).
- Calcio y magnesio intercambiables. Extracción con acetato de amonio (1 M pH 7 y valoración con versenato (EDTA 0.02 N) (Jackson, 1982).
- Sodio y potasio intercambiables. Extracción con acetato de amonio (1 M pH 7 y determinación con fotómetro de llama Corning 400 (Jackson, 1982).
- Capacidad de intercambio catiónico. Saturando con CaCl₂ (0.5 M pH 7), lavando con etanol al 96% y eluyendo con NaCl (1 M pH 7). Valoración con versenato (EDTA 0.02 N) y negro de ericromo T (Jackson, 1982).

- Saturando con acetato de sodio (1 M pH 7), lavando con etanol al 96% y eluyendo con acetato de amonio (1 M pH 7). Valoración con versenato (EDTA 0.02 N) y negro de ericromo T (Jackson, 1982).
- Fósforo asimilable. Por el método Olsen, Bray I y Bray II, en el espectrofotómetro Bacharach, Coleman Mod. 35 (Jackson, 1982).
- Nitrógeno total. Por el método de Kjeldahl (Page, 1982).

2.2 Lípidos

a. Extracción de lípidos

- Equipo Soxhlet

Se obtuvieron dos fracciones de lípidos: libres y ligados. Los libres se extrajeron durante 24 horas en un equipo Soxhlet (500 cc), método 3540 B (EPA, 1998), el cual tiene una eficiencia de extracción mayor del 90%; utilizando como agente extractante el éter de petróleo (punto de ebullición 45-60°C) y diclorometano en relación 3:1 (v/v). Para la obtención de los lípidos ligados al complejo arcilla-humus, se utilizaron las muestras de suelos, previamente extraídos los lípidos libres tras ser hidrolizadas con HCl 0.5 M y eliminación de cloruros por centrifugaciones sucesivas (5,000 rpm). La extracción posterior se llevó a cabo en las mismas condiciones expuestas anteriormente (Moucawi, *et al.*, 1981).

La hidrólisis ácida del suelo permite la ruptura de enlaces asociados a aminoácidos, carbohidratos, compuestos cíclicos nitrogenados y ácidos grasos entre otros; por el contrario, la hidrólisis alcalina es capaz de liberar otros compuestos cíclicos y aromáticos (derivados del

benzeno, naftaleno, antraceno, furano, etc.) y unidades fenólicas que proceden de ligninas o flavonoides (Martínez, 1993).

Es recomendable deshidratar el extracto, con sulfato de sodio anhidro, agitando y filtrando. En caso de que el sulfato de sodio quede endurecido, se repite el tratamiento, lo cual estará en función a la polaridad del solvente, debido a que éstos tienen la capacidad de absorber cierta cantidad del agua higroscópica del suelo.

La extracción de lípidos libres y ligados se realizó en las muestras con los mayores porcentajes de carbono orgánico, que correspondió a las capas superficiales de los perfiles, a diferencia de las calicatas, donde éstas variaron a través de la profundidad.

Para la mejor identificación de las moléculas lipídicas, las muestras se sometieron a saponificación y metilación (Figura 12). La metilación tiene por objeto hacer más volátiles aquellos compuestos orgánicos, que por su baja volatilidad no pueden ser normalmente analizados por cromatografía de gases.

- Extracción con fluidos supercríticos

La EFS se realizó en un equipo Carlo Erba Instruments, Mod. SFE-300, con controlador de temperatura y sistema de bombeo. Los fluidos extractantes fueron CO₂ y CO₂ modificado con 10 % de metanol (porcentaje de volumen basado en el peso de la muestra) (Tabla 4).

Se utilizó una celda de extracción construida con material resistente a altas presiones (acero inoxidable) y con volumen interno de 3.47 cm³. La celda constó de un cuerpo definido por su volumen o capacidad útil, las tapas de los extremos aseguraron el cierre hermético e impidieron el arrastre y pérdida del suelo.

Las condiciones de trabajo se establecieron con base a la densidad de 0.82 g cm^{-3} correspondiente al agente extractante, en Soxhlet (mezcla 3:1 de éter de petróleo (p.e. 30-60°C), con densidades de 0.65 y 1.325 g cm^{-3} respectivamente). Es importante mencionar que la densidad alcanzada en el equipo correspondió a 0.789 g cm^{-3} cercana a 0.82 g cm^{-3} .

Las muestras que se seleccionaron para su extracción con FS correspondieron a los suelos con las mayores proporciones de lípidos totales, obtenidos previamente con el extractor Soxhlet.

Tabla 4. Condiciones de trabajo con CO_2 supercrítico.

	Sin modificador	Con metanol al 10%
Densidad	0.789 g cm^{-3}	0.789 g cm^{-3}
Temperatura	50°C	50°C
Presión	20 MP	14.8 MP
Estática	5 min 10→20 MP	5 min 10→20 MP
Constante	10 min 20 MP	10 min 20 MP
Dinámica	15 min	15 min
Disminución de presión	5 min 20→10 MP	5 min 20→10 MP
Tiempo total	35 min	35 min

Los analitos solubilizados en el FS fueron arrastrados a través del restrictor del flujo y transferidos a un dispositivo colector, que se encontraba a la presión ambiente. Para ello, se insertó el capilar (burbujeo directo) en un matraz cónico de 30 cm^3 de capacidad, con 5 cm^3 de metanol. Después de su recuperación el solvente se evaporó hasta un volumen aproximado de 1 cm^3 para después trasvasarlo a un vial cónico y finalmente concentrarlo bajo ambiente inerte (nitrógeno).

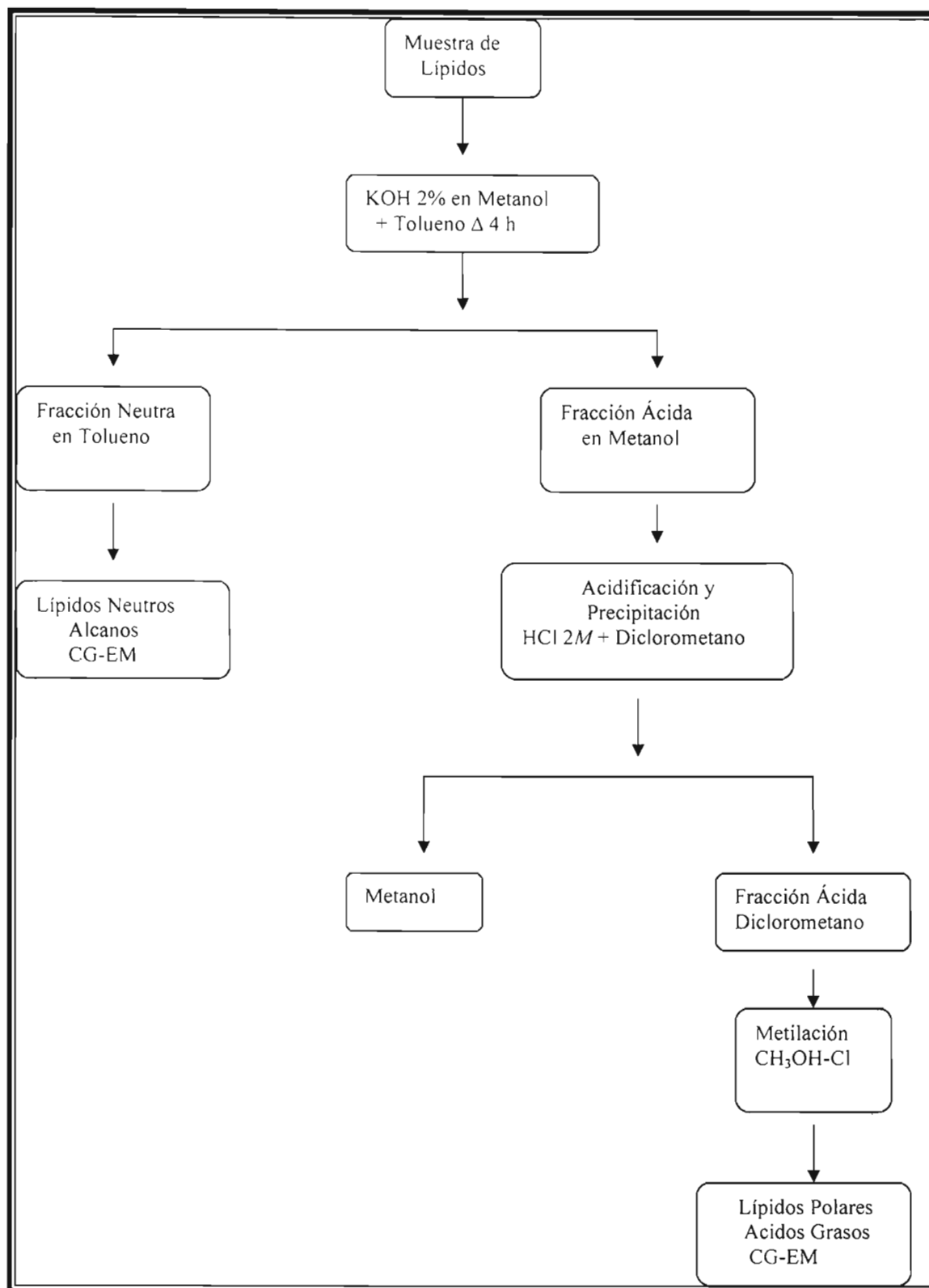


Figura 12. Método de saponificación con potasa y metilación con cloruro de metanol de los extractos lipídicos del suelo.

b. Técnicas en la separación e identificación de compuestos en la fracción de lípidos

- Cromatografía de Gases

Se utilizó una columna capilar de sílice fundida de 20 m de longitud, con diámetro interno de 0.2 mm. con fase de OV-101; instalada en un cromatógrafo de gases Hewlett-Packard mod. 5890, con detector de ionización de llama (FID, Flame Ionization Detector). El conjunto de parámetros cromatográficos seleccionados se indican en la Tabla 5.

- Cromatografía de gases/espectrometría de Masas (GC/MS)

La identificación de los compuestos lipídicos se realizó en un Cromatógrafo de Gases acoplado a un Espectrómetro de Masas (CG/EM). El sistema se caracteriza por integrar dos métodos analíticos instrumentales, en donde se incluye a la identificación y cuantificación de componentes orgánicos en mezclas complejas, considerando como principal ventaja su análisis en tiempos cortos (50 min aproximadamente) y muestras con concentraciones bajas.

La EM es una metodología espectroscópica en la cual se generan espectros característicos y únicos de las moléculas, opera con el principio de promover la ionización de las moléculas de un compuesto y posteriormente separar y cuantificar los diferentes iones que se generan. Para asegurar que las moléculas emerjan en un tiempo constante, la muestra debe calentarse tan pronto entre por la columna y puedan volatilizarse y separarse regularmente las moléculas (Evershed, 1992ab; Gómez y García, 1989).

Previamente al análisis de identificación se requirió establecer la concentración óptima de inyección al sistema, resultando la disolución de 2 mg de muestra lipídica en 100 µl de

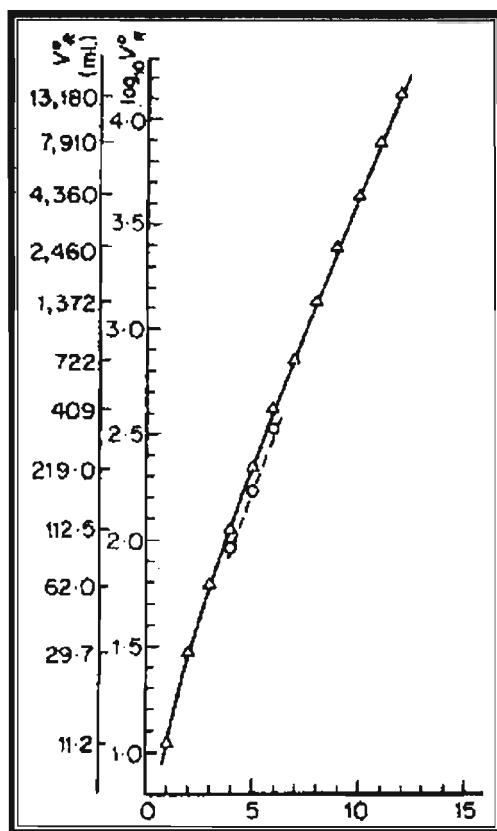
cloroformo, e inyectando únicamente 1 μ l al cromatógrafo. Con esta concentración fue posible obtener la mejor definición de los picos y al mismo tiempo evitar la saturación de la columna. Es importante mencionar, que a temperaturas mayores de 250°C, aumenta la viscosidad de los gases y por tanto el flujo de la columna se reduce considerablemente a la mitad. Sin embargo, lo anterior puede regularse con el controlador de presión del equipo, localizado en la cabeza del inyector, aumentando el flujo del gas a medida que aumenta la viscosidad del mismo logrando la separación definida de los picos.

Con el controlador de presión, fue posible analizar las series homólogas, mediante la técnica de monitorización de ión simple (SIM, single ion monitoring) ya que los distintos componentes de las series homólogas se encuentran separados entre sí a una misma distancia favoreciendo el análisis de los demás compuestos. La técnica consistió en monitorear en el espectrómetro de masas, sólo ciertos fragmentos iónicos característicos y en su mayoría dominantes, para determinadas familias de compuestos, variando únicamente el peso molecular de los homólogos en función del tiempo de retención.

Con lo anterior, una serie homóloga está relacionada con el tiempo de emergencia de la molécula, y como ejemplo podemos citar a los ácidos grasos de cadena lineal, sobre una fase estacionaria a alto vacío. Normalmente el ácido graso de 14 átomos de carbono emerge después de 1 minuto a 186 °C, a continuación el ácido graso con 15 carbonos emerge a 2.3 min, el de 16 carbonos a 2.3² min, el de 17 carbonos a 2.3³ min y así sucesivamente. Si se grafica el logaritmo del tiempo de retención absoluto (o el tiempo de retención relativo) versus la longitud de la cadena, puede obtenerse una línea recta (Figura 16) (Gurr y James, 1980).

Basándose en el comportamiento anterior, es posible predecir los homólogos con fragmentos iónicos incompletos que se desintegran en su mayoría, por el exceso de energía o en su caso

los superiores al rango de detección en unidad de masa atómica (uma) del equipo, ya que por ejemplo en nuestro caso se encontró entre los 40 a 425 uma. Por lo tanto el controlador de presión del equipo, favoreció que el número de carbonos fuera proporcional al tiempo de emergencia relativo o al volumen de retención relativo (volumen de gas requerido para barrer los compuestos de la columna); las series homólogas que se sometieron a este análisis correspondieron a los *n*-alcanos (*m/z* 57), *n*-ácidos grasos metilados (*m/z* 74), *n*-metilcetonas (*m/z* 59), *n*-aldehídos (*m/z* 82) y *n*-alcoholes con comportamiento graso.



no. de átomos de carbono

Figura 13. Relación lineal entre el volumen de retención corregida y la longitud de cadena, para ácidos grasos de cadena corta en 137°C. Fase estacionaria de sílice DC 550 conteniendo ácido esteárico. -Δ-ácido de cadena lineal, -○-ácido de cadena ramificada (De: Gurr y James, 1980).

Para la separación e identificación de los componentes individuales, se utilizó un sistema cromatografía de gases/espectrometría de masas, Hewlett Packard G1800A GCD (System Series Gas Chromatograph Electron Ionization Detector). Manteniendo las mismas condiciones cromatográficas indicadas en la Tabla 5. Como gas portador se usó helio a un flujo de $1 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$. La fuente iónica trabajó en el modo de impacto electrónico (EI) a una energía de 70 eV, presión en 50°C de 7.7 psi, con un rango de masa de 40 a 425 m/z.

La identificación de cada compuesto se basó en los espectros de masas y su comparación con los existentes en (EPA/NIH Mass Spectral Data Base) y en librerías digitales (Wiley y NIST Search), además de espectros publicados en la bibliografía.

Tabla 5. Parámetros del Cromatógrafo de Gases.

Flujo del gas portador (N_2)	$1 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$
Modalidad de inyección	Splitless
Temperatura detector FID	300°C
Temperatura del inyector	250°C
Temperatura del horno	50°C
Temperatura inicial T(1)	100°C
Velocidad hasta T(1)	$30^\circ\text{C min}^{-1}$
Tiempo a T(1)	0 min
Temperatura final T(2)	300°C
Tiempo a T(2)	20 min
Velocidad hasta T(2)	6°C min^{-1}
Total de tiempo	55 min

2.3 Fraccionamiento del suelo

La fracción órgano-mineral interacciona activamente con los lípidos del suelo, por lo que se consideró fraccionar el suelo en arenas, limos y arcillas, y determinar los porcentajes de carbono orgánico en cada una de ellas.

Para la dispersión de las partículas del suelo, las muestras se trasvasaron en agua y se sometieron a ultrasonido (28 kHz), para favorecer la disgregación de los agregados, repitiendo el tratamiento por tres veces. Las fracciones arcilla y limo se separaron con base en la ley de Stokes (dispersión y sedimentación); finalmente las arcillas se condensaron mediante centrifugación a 15,000 rpm (Higashi y Wada, 1985).

a. Fracción orgánica de ácidos húmicos

Después de la extracción de los lípidos totales, los horizontes superficiales (0-10 cm) se sometieron a extracción exhaustiva de ácidos húmicos (AH), a partir de un peso de muestra que se determinó en base a la cuantificación del carbono orgánico total, por lo que el rango varió entre 5 a 16 g de suelo.

En la extracción se utilizó la solución de Kononova ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 0.1 M-NaOH 0.1 M), la suspensión se agitó durante 24 horas, se centrifugó a 5,000 rpm durante 10 min y se separó el sobrenadante que contenía los ácidos húmicos. El proceso se repitió hasta que los extractos presentaron escasa coloración.

Los ácidos húmicos se precipitaron en medio ácido (HCl 2 M) y se lavaron en agua destilada mediante centrifugaciones sucesivas de 5000 rpm durante 5 min, finalmente el precipitado se

sometió a diálisis. Se requirió eliminar los minerales de aluminio y silicio por lo que los suelos se trataron con HCl-HF 1 M (1:1), finalmente se sometieron a diálisis para eliminar los cloruros (Schnitzer, 1978).

Los ácidos húmicos se caracterizaron mediante espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR). Se utilizó la técnica de la pastilla de KBr, en la proporción de 1 mg de AH y 200 mg de KBr, el material se homogeneizó en un mortero de ágata y compactó en una prensa, con una presión de 10 toneladas por centímetro cuadrado. Cada espectro se obtuvo en el rango de 4000 a 500 cm^{-1} , en un espectrofotómetro de infrarrojo Perkin Elmer mod. 683.

b. Fracción mineral

Las arcillas se caracterizaron por difracción de Rayos X, según el método de polvo desorientado. Se utilizó un difractómetro Siemens, modelo D-501; la radiación utilizada fue la $\text{CuK}_{\alpha} 1+2$ (1.54050 Å). La radiación $\text{K}\beta$ y el resto de la radiación continua, procedente del ánodo de Cu se eliminaron mediante un monocromador de grafito situado en la zona del haz difractado. Los barridos de rutina se realizaron entre 2° y 65° del ángulo 2θ , empleando dos divergencias fijas de 1° y una rendija de recepción fija de 0.15° , una anchura de paso de 0.05° y un tiempo de cuenta en cada paso de 1 segundo. Se utilizó un voltaje de aceleración de 36 kV, una corriente de 26 mA y un detector de centelleo. La interpretación de los difractogramas se realizó por comparación del diagrama de DR-X con las fichas JCPDS y las tablas y difractogramas reportados en Brindley y Brown (1984) Brindley y Mac Ewan (1951).

4. Análisis estadísticos.

Para los análisis estadísticos se seleccionaron algunos de los parámetros del suelo, variables ambientales y el extracto lipídico total (E.L.T). Las pruebas estadísticas fueron análisis de regresión lineal, coeficientes de correlación de Pearson y análisis multivariados. En estos últimos se incluyeron el análisis de componentes principales (ACP), análisis de correlación canónica (AC) y el análisis de correspondencia canónica (ACC). Las variables al no tener las mismas unidades de medición se sometieron a estandarización. Los paquetes estadísticos que se utilizaron fueron Statistica ver. 6, Statgraphic ver 5.1 y PC-ORD Ver. 4.33.

El ACP es una técnica de ordenación para datos cuantitativos, los cuales son resumidos en una gráfica que explica la varianza. Ordena en forma jerárquica las variables y refiere los datos originales a un nuevo conjunto de ejes ortogonales, en los que la posición relativa de los puntos en el nuevo espacio de caracteres refleja una aproximación de las posiciones relativas de las variables en el espacio de los caracteres originales. Se parte de la matriz que contiene los datos originales (X_1, X_2, \dots, X_n) se estandarizó mediante de la sustracción de cada valor al promedio $(X_1 - \bar{x}, X_2 - \bar{x}, \dots, X_n - \bar{x})$, de modo que la sumatoria es igual a 0. Posteriormente se calcula el índice de distancia, multiplicando la matriz estandarizada por su trasposición. El índice de distancia se emplea para la generación del dendograma. Al calcular la distancia empleando los índices de correlación (matriz de correlación) pueden obtenerse los eigenvalores y eigenvectores, los primeros explican la varianza observada y los últimos permiten generar el gráfico para la ubicación de componentes principales (Pla, 1986).

El AC es una técnica de ordenación, para estudiar la relación entre dos grupos de variables; su propósito es resumir o explicar las relaciones entre los dos grupos de variables para encontrar un número pequeño de combinaciones lineares de cada grupo de variables que presentan la

mayor correlación posible entre los grupos. Los coeficientes de estas combinaciones son coeficientes canónicos o pesos canónicos. Como siguiente paso se establece un segundo grupo de variables canónicas, los cuales producen un segundo grupo de coeficiente de correlación. El proceso continua hasta que el número de pares es igual al número de variables del menor grupo.

El ACC, es una técnica de ordenación de análisis de gradiente directo, que relaciona la composición de especies con variables medidas; la prueba determina sí un grupo de variables puede explicar alguna variación en la composición de las especies. El análisis selecciona combinaciones lineales de las variables ambientales que maximizan la dispersión de las especies registradas.

V. RESULTADOS Y DISCUSION

1. El extracto lipídico del suelo y su distribución con la profundidad del suelo.

Los suelos se agrupan en función a su origen: el primer grupo corresponde a suelos antrópicos (Xochimilco y Tláhuac, Calicata 1 y 2 respectivamente), los cuales forman parte del agroecosistema chinampero y se han clasificado como Irragric Hortic Anthrosols (Ibañez, *et al.*, 2001). Representan áreas enriquecidas con fuentes orgánicas, en donde destacan los sedimentos lacustres, plantas acuáticas y abonos orgánicos, entre otros. Estos agroecosistemas fueron considerados altamente productivos por largo tiempo; sin embargo, su sostenibilidad se ha visto afectada por las diferentes actividades del hombre. Las alteraciones han surgido, a partir del riego con aguas residuales provenientes de la Ciudad de México, originando problemas de salinidad y alcalinidad y con la alteración del agroecosistema chinampero, como se mencionó previamente en (Mercado, 1993). La conservación del agroecosistema reviste gran importancia por su cercanía a la Ciudad de México, ya que representan áreas de distracción para los habitantes de la región; así mismo por la alta producción de biomasa que se genera, pero principalmente se trata de zonas que favorecen la recarga de los mantos acuíferos en la Cuenca de México.

El segundo grupo, es referido a los suelos con desarrollo genético, donde los factores formadores (clima, vegetación, geología, topografía y el tiempo transcurrido) determinan la productividad de los agroecosistemas. Este grupo incluye a la mayor parte de las muestras colectadas, las cuales se encuentran distribuidas en nueve perfiles (Tabla 6) y su localización geográfica en el país está representada en la Figura 11. Básicamente los sitios de muestreo se localizan en los Estados de Guerrero (Perfiles 1, 2, 3 y 4), Tabasco (Perfiles 5, 6 y 7) y

Michoacán (Perfiles 8 y 9). Los órdenes corresponden a Andisoles, Entisoles e Inceptisoles, clasificados con base a la Soil Taxonomy (1999).

Tabla 6. Clasificación taxonómica de los suelos estudiados, bajo diferentes cultivos agrícolas, con base a las claves de Soil Taxonomy (1999).

Número de perfil	Subgrupo	Cultivo
1	Thaptic Hapludand	Cafeto
2	Lithic Ustorthent	Ajonjolí
3	Typic Ustorthent	Cacahuate
4	Typic Ustipsamment	Coco
5	Typic Eutrudept	Cacao
6	Typic Eutrudept	Pastizal
7	Typic Eutrudept	Cacao
8	Alfic Haplustand	Aguacate
9	Vertic Thaptic Haplustand	Brócoli

1.1 Sistema chinampero

Los suelos agrícolas de Xochimilco (Calicata 1) y Tláhuac (Calicata 2) presentan origen policíclico y antropogénico, como resultado del aporte de materiales orgánicos y sedimentos lacustres obtenidos de los canales de riego. Los suelos pueden presentar rasgos hidromórficos, como resultado del continuo movimiento del nivel freático durante el año.

Los parámetros físicos y químicos de la Calicata 1 (Xochimilco) y Calicata 2 (Tláhuac) se presentan en las Tablas 7 y 8 respectivamente. En ambos sitios los colores en seco corresponden a tonalidades de grises, principalmente en las capas superiores; sin embargo existen cambios localizados en capas inferiores ya que en algunos casos pueden presentarse

Tabla 7. Resultados de los análisis físicos y químicos de la Calicata 1, en San Luis Tlaxialtemalco, Xochimilco, cultivada con *Zea mays* L.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. g kg ⁻¹	Limo	Arc.	Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo															
0 --10	10 YR 5/1	10 YR 2/1	0.51	2.14	76.2	200	480	320	M ARC LIM	7.3	8.7	126	46.2	15.4	13.1	2.3	46.1
10 -- 20	10 YR 5/1	10 YR 2/1	0.51	2.16	76.3	200	480	320	M. ARC. LIM.	8.1	8.4	121	43.5	16.3	12.6	2.5	45.6
20 -- 30	10 YR 5/1	10 YR 2/1	0.52	2.32	77.6	200	500	300	M. ARC. LIM.	7.9	8.2	117	38.4	20.3	12.9	2.1	47.6
30 -- 40	10 YR 5/1	10 YR 2/1	0.47	2.28	79.3	270	540	190	M. LIM.	7.7	8.1	117	39.5	20.9	13.8	1.8	45.6
40 -- 50	10 YR 5/1	10 YR 2/1	0.48	2.15	77.6	270	540	190	M. LIM.	7.5	8.1	112	34.5	24.6	11.9	1.4	43.3
50 -- 60	10 YR 5/1	10 YR 2/1	0.45	1.97	77.2	200	580	220	M ARC LIM	7.4	7.9	106	26.9	26.9	11.3	0.3	38.9
60 -- 70	10 YR 7/1	10 YR 2/2	0.42	1.86	77.4	180	600	220	M. LIM.	7.3	7.8	102	19.3	26.9	9.2	0.6	34.9
70 -- 80	10 YR 4/1	10 YR 2/1	0.49	1.78	72.5	350	460	190	FRANCO	7.2	7.4	421	61.6	53.9	13.9	0.5	92.3
80 -- 90	10 YR 5/1	10 YR 2/1	0.41	1.74	76.4	180	520	300	M. LIM.	6.8	7.2	279	42.4	46.2	11.8	0.4	73.3
90 -- 100	10 YR 8/1	10 YR 2/1	0.28	1.77	84.1	180	640	180	M. LIM.	6.5	6.9	179	23.1	26.9	9.2	0.3	48.2
100--110	10 YR 3/1	10 YR 2/1	0.46	1.74	73.6	370	460	170	FRANCO	5.9	6.3	488	46.2	57.5	12.3	0.4	90.8

*

10 YR 8/1 = blanco

10 YR 7/1 = gris claro

10 YR 5/1 = gris

10 YR 4/1 = gris oscuro

10 YR 3/1 =gris muy oscuro

10 YR 2/2 = pardo muy oscuro

**

M. = migajón

LIM. = limoso

ARC. = arcilloso

P = porosidad

tonalidades de gris oscuro o gris muy oscuro. En los suelos de Xochimilco se observa una capa blanca debajo de los 60 cm de profundidad, caracterizada por su amplia distribución, alcanzando un grosor de 10 cm como promedio. Investigaciones previas concluyeron que la capa blanca presenta gran cantidad de materiales de origen biogénico, la cual se caracteriza por altos contenidos de $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, esqueletos de diatomeas y fitolitos (García-Calderón *et al.*, 1996; Reyes, 1997).

En función a la profundidad se observan incrementos en los contenidos de carbono orgánico y nitrógeno total. En el caso de los suelos de Xochimilco se determina el aumento a partir de los 70 cm y en Tláhuac después de los 120 cm de profundidad (Tablas 9 y 10). El incremento probablemente se origina, a partir de las condiciones anaerobias que prevalecen en el medio, conduciendo a la preservación de la materia orgánica, aunado a las diferentes interacciones de sorción y enlaces químicos entre moléculas orgánicas y minerales, los cuales son determinantes en la preservación del carbono orgánico (González-Vila *et al.* 1995).

De acuerdo con investigaciones previas (Wada y Aomine, 1973) el alofano y las arcillas esmectíticas pueden estabilizar fuertemente al carbono orgánico y reducir significativamente su mineralización. Algunos autores han reportado la presencia de esmectitas y alofano en los suelos antropogénicos de Xochimilco y Tláhuac (García-Calderón *et al.*, 1994; Reyes, 1997), lo que podría explicar la preservación del carbono orgánico.

Las relaciones C/N en ambos sitios generalmente son menores de 10, lo cual es considerado como un rasgo típico del humus acuático, tanto para sedimentos marinos como continentales y además se relaciona a las elevadas cantidades de nitrógeno que ingresa con el riego. En el caso de los suelos con carácter hidromórfico, parte de estas características pueden atribuirse a la formación de fracciones estables con el nitrógeno, pudiendo permanecer en forma no

Tabla 8. Resultados de los análisis físicos y químicos de la Calicata 2, en San Andrés Mixquic, Tlahuac, cultivada con *Brassica oleracea var. cauliflora*.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. g kg ⁻¹	Limo	Arc.	Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo															
0 -- 10	10 YR 5/1	10 YR 3/1	0.55	2.43	77.4	350	420	230	FRANCO	7.6	8.1	112	46.2	38.5	14.4	1.7	84.2
10 -- 20	10 YR 5/1	10 YR 3/1	0.55	2.32	76.3	370	380	250	FRANCO	7.5	8.1	111	44.3	32.7	10.4	1.3	54.4
20 -- 30	10 YR 5/1	10 YR 3/1	0.55	2.45	77.6	330	400	270	FRANCO	7.4	8.1	108	40.43	30.8	10.4	2.6	57.1
30 --40	10 YR 5/1	10 YR 3/1	0.57	2.21	74.2	350	420	230	FRANCO	7.4	7.9	102	38.5	30.8	10.6	2.4	54.7
40 -- 50	10 YR 5/1	10 YR 3/1	0.61	2.21	72.4	330	440	230	FRANCO	7.2	7.8	96	36.6	11.6	8.1	1.5	50.1
50 -- 60	10 YR 5/1	10 YR 3/1	0.57	2.14	73.4	430	460	110	FRANCO	7.2	7.8	138	59.7	61.6	11.8	0.8	62.4
60 --70	10 YR 7/1	10 YR 4/1	0.43	2.33	81.5	430	300	270	FRANCO	7.2	7.7	101	34.7	42.4	10.1	0.8	56.3
70 -- 80	10 YR 7/1	10 YR 4/1	0.45	2.38	81.1	240	400	360	M. ARC.	7.1	7.7	94	30.8	28.9	8.3	1.1	40.3
80 -- 90	10 YR 7/1	10 YR 4/1	0.41	2.14	80.8	240	380	380	M. ARC.	6.9	7.6	97	30.8	28.9	8.3	1.1	59.2
90 --100	10 YR 7/1	10 YR 4/1	0.39	2.19	82.2	300	320	380	M. ARC.	6.8	7.5	93	25.1	30.8	8.1	0.9	59.4
100--110	10 YR 7/1	10 YR 4/1	0.37	1.96	81.1	240	360	400	M. ARC.	6.7	7.6	93	21.2	32.7	6.4	0.5	43.9
110--120	10 YR 7/1	10 YR 4/1	0.45	1.58	71.5	380	360	260	M. ARC. AR.	6.9	7.7	106	10.3	80.1	6.4	0.7	41.2
120--130	10 YR 3/1	10 YR 2/1	0.39	1.63	76.1	680	220	98	M. ARC. AR.	6.8	7.2	563	50.1	80.9	10.4	0.6	111.1
130--140	10 YR 3/1	10 YR 2/1	0.33	1.59	79.2	680	220	98	M. ARC. AR.	6.8	7.3	656	40.4	69.3	10.9	0.6	117.4
140--150	10 YR 2/1	10 YR 2/1	0.33	1.65	80.1	680	240	78	M. ARC. AR.	6.7	7.3	557	25.1	61.6	11.3	0.8	96.2
150--160	10 YR 3/1	10 YR 2/1	0.39	1.63	76.1	780	160	58	M. AR.	6.6	7.1	586	36.6	63.5	9.2	0.8	82.3
160--170	10 YR 3/1	10 YR 2/1	0.45	1.88	76.1	710	250	58	M. AR.	6.5	7.3	406	23.1	57.8	8.3	1.2	84.4
170--180	10 YR 2/1	10 YR 2/1	0.45	1.63	72.4	780	160	58	M. AR.	6.3	7.1	564	28.6	78.9	9.2	0.9	124.5

*

10 YR 7/1 = gris claro
 10 YR 5/1 = gris
 10 YR 4/1 = gris oscuro
 10 YR 3/1 = gris muy oscuro
 10 YR 2/1 = negro

**

M. = migajón
 AR. = arenoso
 ARC. = arcilloso
 P = porosidad

hidrolizable y ligarse a las huminas o a compuestos lignoprotéicos y estar retenidos en la fracción mineral (Almendros *et al.*, 1989; Duchaufour, 1984). Estudios previos en los suelos de Xochimilco y Tláhuac han reportado que la distribución del nitrógeno orgánico no-hidrolizable, está en el orden de 35 a 49 g kg⁻¹ de nitrógeno total (García-Calderón *et al.*, 1994), por lo que una fracción importante del nitrógeno se encuentra de manera estable.

En las tablas 9 y 10, observamos que los contenidos del extracto lipídico total de los suelos de Xochimilco y Tláhuac se establecen en el orden de 1 a 13 g kg⁻¹, los cuales se encuentran en el rango de valores reportados para suelos con diferente distribución geográfica en el mundo (Chae y Lowe, 1981; Diné *et al.*, 1988; Galoppini y Riffaldi, 1969).

En la Calicata 1, se registran 2.27 g kg⁻¹ de extracto total de lípidos para los primeros 10 cm de profundidad del suelo, debe señalarse que el muestreo se realizó después de la cosecha del cultivo de maíz (con 470 g kg⁻¹ de grasa total); por el contrario, en la Calicata 2 (Tláhuac) se obtiene 1.23 g kg⁻¹ de extracto total de lípidos para el suelo a la misma profundidad, pero cultivado con brócoli (con 30 g kg⁻¹ de grasa total); el valor corresponde a la mitad del reportado en la Calicata 1.

El carbono orgánico tiende a incrementarse con la profundidad; en relación a los suelos de Tláhuac se refleja un incremento concomitante entre el carbono orgánico y el contenido de los lípidos totales, debido a que se observan correlaciones altamente significativas ($p < 0.0001$), sin embargo para los suelos de Xochimilco se presenta una baja correlación entre las mismas variables ($p < 0.105$) (Figura 13). Fridland (1982) reporta que el contenido relativo de lípidos es inversamente proporcional a la actividad biológica y su permanencia en el suelo también se incrementa con la acumulación progresiva de lípidos.

Tabla 9. Composición química y distribución del extracto lipídico en la Calicata 1, Xochimilco, con cultivo de maíz.

Prof. cm	C	N	C/N	P g kg ⁻¹	Lípidos (g kg ⁻¹)		
	g kg ⁻¹				Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	73	14	5	1.94	1.05	1.22	2.27
10 -- 20	71	12	6	1.52	1.02	1.19	2.21
20 -- 30	68	12	6	1.26	0.94	1.14	2.08
30 -- 40	68	11	6	0.92	0.92	1.69	2.61
40 -- 50	65	9	7	0.76	1.21	2.01	3.22
50 -- 60	61	6	10	0.60	1.81	2.33	4.14
60 -- 70	59	9	7	0.63	0.47	1.69	2.16
70 -- 80	244	25	10	0.46	1.71	1.45	3.16
80 -- 90	162	26	6	0.81	1.21	0.41	1.62
90 -- 100	134	15	9	0.37	0.35	0.36	0.71
100 -- 110	283	37	8	0.57	3.01	2.16	5.17

Tabla 10. Composición química y distribución de lípidos en la Calicata 2, Tláhuac, con cultivo de brócoli.

Prof. cm	C	N	C/N	P g kg ⁻¹	Lípidos (g kg ⁻¹)		
	g kg ⁻¹				Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	65	19	3	0.36	0.51	0.72	1.23
10 -- 20	64	18	4	0.29	0.34	0.56	0.90
20 -- 30	63	16	4	0.36	0.46	0.65	1.11
30 -- 40	59	17	3	0.40	0.47	0.44	0.91
40 -- 50	56	12	5	0.27	0.47	0.53	1.00
50 -- 60	79	19	4	0.39	0.57	0.17	0.74
60 -- 70	59	17	3	0.37	0.41	0.47	0.88
70 -- 80	55	14	4	0.32	0.37	0.51	0.88
80 -- 90	56	14	4	0.34	0.35	0.56	0.91
90 -- 100	54	17	3	0.35	0.37	0.55	0.92
100 -- 110	54	14	4	0.30	0.33	0.56	0.89
110 -- 120	61	13	5	0.37	0.43	0.68	1.11
120 -- 130	327	41	8	0.46	1.09	1.43	2.52
130 -- 140	361	64	6	0.33	1.79	4.47	6.26
140 -- 150	322	51	6	0.20	4.19	2.18	6.37
150 -- 160	339	42	8	0.23	4.15	2.38	6.53
160 -- 170	235	35	7	0.29	1.01	3.35	4.36
170 -- 180	327	44	7	0.35	4.12	8.88	13.00

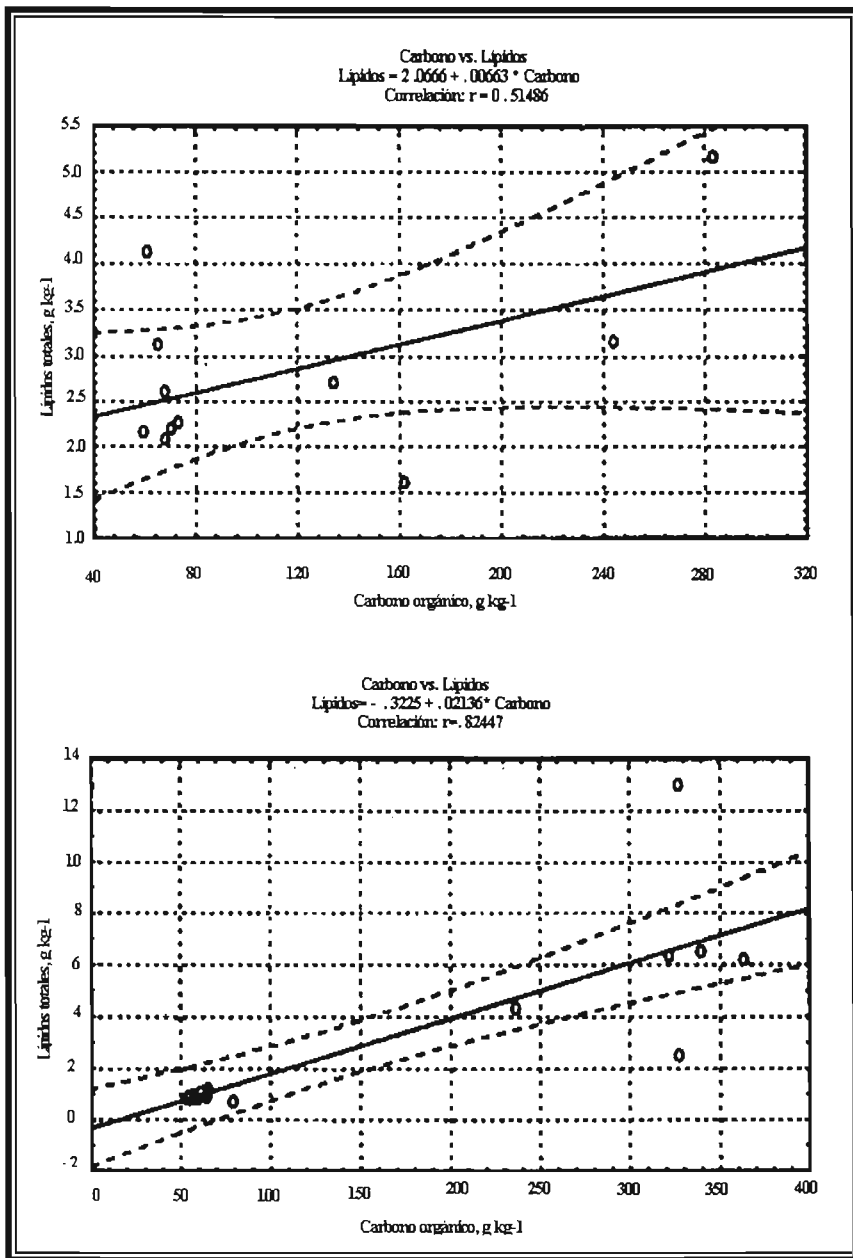


Figura 14. Análisis de regresión entre el carbono orgánico total y el contenido de lípidos totales. (a) Los suelos de Xochimilco no fueron significativos. (b) Los suelos de Tláhuac fueron altamente significativos. Las líneas punteadas representan el intervalo de confianza del 95%.

La fracción lipídica de estos suelos está constituida principalmente por compuestos que se encuentran ligados a la fracción órgano-mineral, lo cual puede atribuirse a la diversidad y actividad de los microorganismos durante los estados iniciales de acumulación, así como a la

Tabla 11. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 1, con cultivo de cafeto.

Prof. cm	C N		C/N	P g kg ⁻¹	Lípidos (g kg ⁻¹)		
	g kg ⁻¹				Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	76	11	7	0.14	2.15	2.43	4.58
10 -- 20	69	9	8	0.13	0.39	2.10	2.51
20 -- 30	59	7	8	0.11	1.98	0.35	2.33
30 --40	47	6	8	0.03	0.31	0.44	0.75
40 -- 50	24	3	8	0.02	0.21	0.16	0.37
50 -- 60	18	2	9	0.02	0.22	0.15	0.37
60 --70	15	1	15	0.02	0.21	0.15	0.36
70 -- 80	11	1	11	0.02	0.19	0.13	0.32
100--110	8	1	8	0.01	0.27	0.09	0.36
110--120	9	1	9	0.01	0.18	0.11	0.29
120--130	29	2	15	0.02	0.28	0.18	0.46
130--140	21	1	21	0.02	0.33	0.09	0.42
140--150	21	2	11	0.02	0.31	0.11	0.42

Tabla 12. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 2, con cultivo de ajonjolí.

Prof. cm	C N		C/N	P g kg ⁻¹	Lípidos (g kg ⁻¹)		
	g kg ⁻¹				Libres	Ligados	Totales
0 --10	4	1	4	0.281	0.29	0.16	0.45
10 --20	3	1	3	0.223	0.09	0.08	0.17
20 --30	1	n.d.	n.d.	0.205	0.06	0.03	0.09

naturaleza de las sustancias húmicas, ya que de acuerdo a Wagner y Muzorewa (1977) los microorganismos sintetizan parte de los lípidos que se incorporan al humus del suelo, y se unen mediante diversos enlaces de tipo éster y/o covalentes.

Los sitios de Xochimilco y Tláhuac presentan diferente manejo agrícola, ya que por ejemplo en Xochimilco (Calicata 1), se puede obtener maíz-hortalizas durante el año, ya que existe un canal de riego cercano al terreno; a diferencia de la zona de Tláhuac (Calicata 2), donde esta práctica se encuentra limitada, obteniéndose únicamente cultivos de temporal.

A pesar de lo anterior los resultados indican una mayor similitud entre las capas superficiales (0-10 cm) de ambos sitios y lo mismo ocurre en las capas profundas (100-110 y 170-180 cm). Por lo tanto existe una variabilidad vertical, donde el ambiente hidromórfico ha jugado un papel clave en este comportamiento.

1.2 Suelos con desarrollo genético

El segundo grupo de suelos se caracteriza por presentar desarrollo genético (Entisoles, Inceptisoles y Andisoles), de manera general han recibido aportes fluviales o aluviales, aunque los factores que han originado el efecto diferencial de los perfiles son la altitud, temperatura, precipitación y geología, como puede observarse en la Tabla 3. Todo lo anterior ha favorecido la adaptación de una amplia diversidad de recursos bióticos en los diferentes sitios de muestreo, aunque debe mencionarse que en los últimos años éstos han sido substituidos por cultivos agrícolas, tanto anuales como perennes. Algunos de ellos con desarrollo óptimo, se consideran como cultivos económicamente rentables; además, han asegurado la conservación del recurso suelo y reducción de los efectos de erosión proporcionando continuamente residuos orgánicos y preservando el equilibrio de humedad del suelo.

Tabla 13. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 3, con cultivo de cacahuate.

Prof. cm	C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	Lípidos (g kg ⁻¹)		
					Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	4	1.0	4	0.37	0.21	0.12	0.33
10 -- 20	3	1.0	3	0.23	0.11	0.04	0.15
20 -- 30	2	n.d.	n.d.	0.21	0.05	0.06	0.11
30 --40	1	n.d.	n.d.	0.22	0.08	0.04	0.12

Tabla 14. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 4, con cultivo de coco.

Prof. cm	C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	Lípidos (g kg ⁻¹)		
					Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	18	3	6	0.075	0.22	0.14	0.36
10 -- 20	11	2	6	0.028	0.09	0.05	0.14
20 -- 30	7	1	7	0.036	0.07	0.03	0.10
30 --40	4	1	4	0.030	0.07	0.02	0.09

Los Perfiles 1, 2, 3 y 4 se localizan en el Estado de Guerrero (Figura 11), aunque presentan diferencias altitudinales, climáticas y geológicas, los suelos se agrupan en dos ordenes: Andisol y Entisol (Apéndice I). Lo anterior ha favorecido el establecimiento de cultivos agrícolas importantes para México, que se caracterizan por su alto contenido en grasa total (Apéndice II, Tabla 38, De Chávez *et al.*, 1992), con excepción del fruto del cafeto el cual sólo alcanza 6 g kg^{-1} .

En las Tablas 11, 12, 13 y 14 se presenta la distribución de lípidos libres, ligados y totales de los perfiles mencionados; que corresponden a las profundidades donde se determinaron los mayores niveles de carbono orgánico total (COT). Puede observarse que en todas las muestras existe una relación directa entre el COT y el extracto de lípidos totales, ya que el análisis estadístico muestra una fuerte correlación de $r = 0.78$ (Figura 15). Además debe señalarse que los resultados de este estudio coinciden con los valores registrados para Spodosoles (Naafs, *et al.*, 2004b).

Es importante resaltar que en el Perfil 1 con cultivo de cafeto, se presenta el mayor contenido de COT y por consiguiente de lípidos totales, lo cual puede explicarse a partir de la participación de los factores abióticos que predominan en el agroecosistema (Tabla 15). La Pintada, ubicada en el municipio de Atoyac de Álvarez registra temperatura media anual de 17°C y precipitación anual de 1704 mm, ambos factores han permitido una mayor conservación de la materia orgánica del suelo. Por otro lado la precipitación ha contribuido a la desbasificación de los suelos, creando condiciones de acidez, con pH de 4.8 a 3.7 (en KCl 1:2.5). A su vez, diferentes investigaciones han demostrado que la acidez del suelo favorece la conservación de la fracción lipídica del suelo (Jambu *et al.*, 1978; Diné *et al.*, 1990; Stevenson, 1994). Asimismo, Stevenson (1966) reportó que en algunas plantaciones de cafeto

Tabla 15 . Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil I (Thaptic Hapludand), La Pintada, Atoyac de Alvarez, Guerrero, cultivado con *Coffea arabica*.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. g kg ⁻¹	Limo	Arc.	Clase Textural**	pH KC 1:2.5	pH H ₂ O 1:2.5	pH NaF 1N	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo																
0 --10	7.5 YR 5/2	7.5 YR 3/2	0.86	2.58	66.7	422	200	358	M. ARC.	4.8	5.9	10.3	131	9.4	3.8	0.3	1.4	18.1
10 --20	7.5 YR 5/2	7.5 YR 4/2	0.97	2.58	62.4	451	221	328	M. ARC.	4.8	5.4	10.3	118	5.8	5.8	0.3	1.4	16.6
20 --30	7.5 YR 5/4	7.5 YR 4/2	0.91	2.51	63.6	404	360	236	FRANCO	4.5	5.2	10.9	103	5.8	1.9	0.4	1.3	13.7
30 --40	7.5 YR 5/4	7.5 YR 4/4	0.88	2.68	67.2	428	360	212	FRANCO	4.4	5.4	11.0	82	3.9	3.9	0.3	1.4	11.7
40 --50	7.5 YR 6/4	7.5 YR 5/4	0.99	2.62	62.2	408	340	252	FRANCO	4.2	5.4	10.5	42	0.9	0.9	0.3	1.3	8.1
50 --60	7.5 YR 6/4	7.5 YR 5/4	1.11	2.68	58.6	468	270	262	FRANCO	4.1	5.2	10.2	31	2.9	0.9	0.3	1.3	8.8
60 --70	7.5 YR 6/4	7.5 YR 5/6	1.17	2.77	57.8	488	300	212	FRANCO	3.8	4.6	10.2	25	3.9	3.9	0.2	1.3	8.5
70 --80	7.5 YR 6/4	7.5 YR 5/8	1.18	2.71	56.3	486	300	214	FRANCO	3.8	5.2	10.2	19	0.9	3.9	0.2	1.6	5.6
80 --90	7.5 YR 7/4	7.5 YR 6/8	1.15	2.71	57.4	486	300	214	FRANCO	3.7	4.8	10.3	15	0.8	2.9	0.2	1.7	4.8
90 --100	7.5 YR 7/4	7.5 YR 6/8	1.17	2.62	55.3	504	290	206	FRANCO	3.7	5.1	10.3	15	2.9	4.8	0.4	0.2	8.2
100--110	7.5 YR 7/6	7.5 YR 7/8	1.18	2.67	55.8	508	270	222	FRANCO	3.7	4.5	10.5	14	1.9	6.4	0.3	0.7	10.3
110--120	7.5 YR 6/6	7.5 YR 4/6	1.18	2.64	55.3	448	320	232	FRANCO	3.7	4.5	10.0	15	1.9	6.4	0.3	0.7	11.8
120--130	7.5 YR 6/4	7.5 YR 3/4	0.94	2.63	64.3	428	260	312	M. ARC.	3.7	4.5	10.7	51	1.9	2.1	0.3	0.7	14.9
130--140	7.5 YR 6/4	7.5 YR 3/4	1.03	2.67	61.4	386	300	314	M. ARC.	3.7	4.4	10.4	35	1.9	2.1	0.2	0.7	14.9
140--150	7.5 YR 6/4	7.5 YR 3/4	1.06	2.64	59.8	406	280	314	M. ARC.	3.7	4.6	10.4	35	1.1	0.9	0.2	0.7	15.8

*

7.5 YR 3/2; 4/2; 4/4 = pardo oscuro

7.5 YR 3/4; 4/6 = pardo fuerte

7.5 YR 5/2; 5/4; 5/6; 5/8 = pardo

7.5 YR 6/4 = pardo claro

7.5 YR 6/6; 6/8; 7/4; 7/6; 7/8 = amarillo rojizo

**

M. = migajón

ARC. = arcilloso

P = porosidad

del Brasil, cerca de la mitad de la materia orgánica del suelo se encuentra en forma de material ceroso. Por lo que el alto extracto lipídico de los suelos cafetaleros del Perfil 1, podría originarse del aporte del follaje de los cafetos.

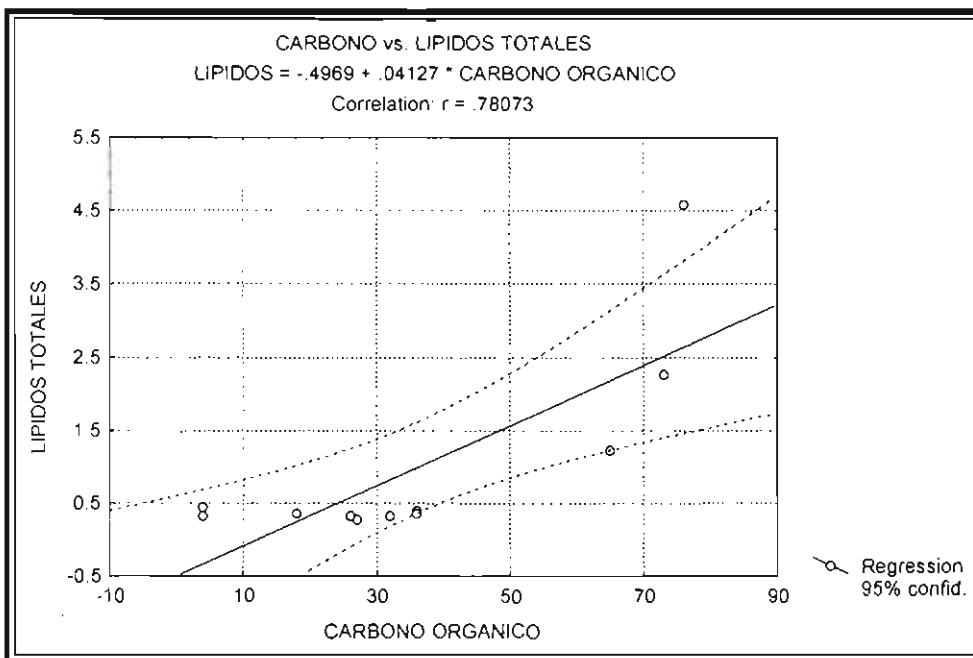


Figura 15. Análisis de regresión entre el carbono orgánico total y el contenido de lípidos totales considerando todos los sitios de muestreo (calicatas y perfiles) para la profundidad 0-10 cm.

Por otro lado, la Tabla 15 y la descripción morfológica de campo (Apéndice I), nos indica que en el Perfil 1 existe una discontinuidad edafológica, esto ocurre a partir de los 120 cm de profundidad, por lo que se clasificaron como Thaptic Hapludand. Debe mencionarse que en áreas cercanas también se han reportado discontinuidades edafológicas, como resultado de los aportes continuos de cenizas volcánicas, lo cual ha modificado e interrumpido el desarrollo de los suelos (Jasso, 1997). Por lo anterior, se decidió realizar extracciones de los grupos

Tabla 16. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 2 (Lithic Ustorthent), Tepecoacuilco de Trujano, Guerrero, cultivado con *Seasamum indicum*.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. g kg ⁻¹	Limo	Arc.	Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo															
0 -- 10	10 YR 6/2	10 YR 3/2	1.36	2.69	53.3	472	424	104	FRANCO	7.7	7.8	6.1	53.9	5.8	0.3	0.7	21.2
10 -- 20	10 YR 6/2	10 YR 3/2	1.35	2.69	49.8	452	462	86	M. AR.	7.9	7.8	4.9	64.5	6.7	0.2	0.7	21.2
20 -- 30	10 YR 6/2	10 YR 3/2	1.41	2.77	49.1	451	501	48	M. AR.	8.1	7.9	2.1	61.6	7.7	0.2	0.9	21.2

*

10 YR 6/2 = gris pardo claro

10 YR 3/2 = pardo grisáceo muy oscuro

**

M. = migajón

AR. = arenoso

P = porosidad

lipídicos a estas profundidades y se observa que los niveles aumentaron entre capas cercanas de 0.29 a 0.46 g k⁻¹, relacionados directamente con el COT.

A lo largo del Perfil 1 se indica la presencia de alofano, acentuada principalmente en los primeros 30 cm de profundidad y nuevamente a partir de los 120 cm; ya que los valores de pH en NaF van de 10 a 11. El alofano en los suelos contribuye a la acumulación de compuestos orgánicos (Oades. 1989), por lo que también puede favorecer la acumulación de los grupos lipídicos.

Para ambas secciones del perfil, el color del suelo (en seco y húmedo), indica la acumulación del carbono orgánico, dominando los colores pardo oscuro y pardo fuerte en condiciones húmedas.

Por otro lado, en los suelos ácidos existe una relación directa con la fracción lipídica y la estabilidad de los agregados (Jambu *et al.*, 1983); a partir de la descripción de campo, en los suelos cafetaleros fue posible observar que existen mejores condiciones en la resistencia de los agregados, ya que se trata de suelos con tendencia a la acidez; sin embargo para profundizar en estos aspectos sería conveniente realizar pruebas de laboratorio en relación a la estabilidad de los agregados.

Los Perfiles 2 y 3 se localizan en el Municipio de Tepecoacuilco de Trujano, al norte de Chilpancingo. La zona tiene clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura media anual que se alcanza es de 26 °C, con precipitación anual de 1015 mm (García, 1981).

La geología corresponde al Cretácico superior en donde se originó una serie de levantamientos; posteriormente en el Terciario superior se formó una cubierta por tobas y corriente de lava provenientes de grietas y fallas. Su configuración actual data del Oligoceno, Mioceno y recientemente del Plioceno; se formaron fallas que dan un carácter de mesetas

Tabla 17. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 3 (Typic Ustorthent), Tepecoacuilco de Trujano, Guerrero, cultivado con *Arachis hypogaea*.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. g kg ⁻¹	Limo	Arc.	Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo															
0 -- 10	5 YR 6/3	5 YR 3/3	1.31	2.74	52.2	436	400	164	FRANCO	7.8	7.9	7.6	54.9	9.6	0.3	0.8	33.6
10 -- 20	5 YR 6/2	5 YR 3/3	1.25	2.74	54.4	526	310	164	FRANCO	7.8	8.1	4.5	54.9	0.4	0.3	0.8	34.2
20 -- 30	5 YR 6/2	5 YR 3/3	1.31	2.73	52.1	596	240	164	M. AR.	7.8	8.1	4.1	61.6	0.5	0.3	0.8	31.7
30 -- 40	5 YR 5/2	5 YR 3/3	1.24	2.67	53.4	616	260	124	M. AR.	7.8	8.1	1.7	56.8	0.8	0.3	1.1	29.6
40 -- 50	5 YR 5/2	5 YR 3/3	1.24	2.76	55.1	636	240	124	M. AR.	7.8	8.1	2.5	55.8	0.6	0.3	1.1	32.1
50 -- 60	5 YR 5/2	5 YR 3/3	1.21	2.66	54.3	676	220	104	M. AR.	7.9	8.1	2.3	53.9	0.7	0.3	1.1	31.5
60 -- 70	5 YR 5/2	5 YR 3/3	1.21	2.74	55.8	656	200	144	M. AR.	7.8	8.1	2.4	51.9	0.4	0.3	1.1	32.1
70 -- 80	5 YR 5/2	5 YR 3/3	1.33	2.71	50.9	716	180	104	M. AR.	7.8	8.1	2.5	66.4	0.7	0.4	1.4	30.8
80 -- 90	5 YR 5/2	5 YR 3/3	1.29	2.73	52.7	756	160	84	M. AR.	7.8	8.3	2.4	46.2	0.5	0.2	1.1	29.2
90 -- 100	5 YR 5/2	5 YR 3/3	1.28	2.71	52.6	696	200	104	M. AR.	7.8	8.2	2.1	48.1	0.8	0.2	1.1	30.7
100 -- 110	5 YR 5/2	5 YR 3/3	1.36	2.78	51.1	656	240	104	M. AR.	7.9	8.5	1.3	48.1	0.5	0.3	1.1	32.1
110 -- 120	5 YR 5/2	5 YR 4/2	1.31	2.66	50.8	636	220	144	M. AR.	7.9	8.5	2.7	53.9	0.4	0.6	1.6	33.5
120 -- 130	5 YR 5/2	5 YR 4/2	1.24	2.67	53.6	556	260	184	M. AR.	7.8	8.5	4.1	46.2	0.7	0.4	1.1	37.2
130 -- 140	5 YR 5/2	5 YR 4/2	1.21	2.66	54.5	556	240	204	M. AR.	7.9	8.4	2.7	48.1	0.5	0.4	1.1	36.9
140 -- 150	5 YR 5/2	5 YR 4/2	1.21	2.67	55.4	556	220	224	M. AR.	7.8	8.4	2.7	58.7	0.1	0.4	1.1	38.1

*

5 YR 3/3 = pardo rojizo oscuro
 5 YR 4/2 = gris rojizo oscuro
 5 YR 5/2 = gris rojizo
 5 YR 6/2 = gris rosáceo
 5 YR 6/3 = pardo rojizo claro

**

M. = migajón
 AR. = arenoso
 P = porosidad

interiores. Como material parental existen areniscas y lutitas (Secretaría de Gobernación y Gobierno de Guerrero, 1988).

En los Perfiles 2 y 3, el contenido de lípidos totales se encuentra influenciado tanto por las propiedades de los suelos como por las plantas cultivadas. El ajonjolí, y cacahuate se agrupan dentro de las oleaginosas, conteniendo 509 g kg^{-1} y 497 g kg^{-1} de grasa total respectivamente (De Chávez *et al.*, 1992).

El Perfil 2 cultivado con ajonjolí, se clasifica como Lithic Ustorthent ya que es un suelo poco profundo, encontrándose el material parental a los 30 cm; los colores del suelo van de gris pardo claro en seco y pardo grisáceo muy oscuro en húmedo, indicando poca influencia de la materia orgánica. Debe mencionarse que éste es uno de los sitios donde se presentan los niveles menores de COT, en el intervalo de 1 a 4 g kg^{-1} (Tabla 16); los carbonatos aumentan fuertemente a partir de los 20 cm, y por consiguiente el pH tiende a la alcalinidad con 7.7 a 8.1 en KCl relación 1:5.

Como ya se mencionó, las condiciones anteriores no favorecen la acumulación de los compuestos lipídicos; sin embargo, el Perfil 2 presenta 0.45 g kg^{-1} de lípidos totales (0-10 cm), superando los valores registrados de los demás sitios (sin considerar al Perfil 1). Lo anterior podría relacionarse directamente con los aportes del cultivo de ajonjolí, ya que su nivel en grasa total supera al resto de los cultivos (De Chávez *et al.*, 1992).

El Perfil 3 con cultivo de cacahuate, se localiza a 1500 metros de distancia del Perfil 2, por lo que algunos parámetros están muy relacionados, como es la tendencia a la alcalinidad, la clase textural que va de franco a migajón arcilloso, así como los contenidos bajos en COT ($4 \text{ a } 1 \text{ g kg}^{-1}$).

Tabla 18. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 4 (Typic Ustipsamment), Coyuca de Benítez, Guerrero, cultivado con *Cocos nucifera*.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. Limo Arc.			Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo				g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹									
0 --10	10 YR 5/4	10 YR 3/3	1.09	2.81	61.1	296	600	104	M. LIM.	5.8	7.1	31	9.6	0.3	0.3	0.9	17.2
10 --20	10 YR 5/4	10 YR 3/3	1.15	2.78	58.6	296	600	104	M. LIM.	5.7	6.9	19	8.7	0.2	0.3	0.9	18.6
20 --30	10 YR 5/4	10 YR 3/3	1.17	2.76	57.6	396	520	84	M. LIM.	5.5	6.9	11	7.7	0.1	0.2	0.7	11.3
30 --40	10 YR 5/4	10 YR 3/4	1.17	2.78	57.9	516	440	44	M. AR.	5.1	6.9	6	6.7	0.1	0.2	0.8	9.5
40 --50	10 YR 5/4	10 YR 3/4	1.14	2.81	59.4	456	500	44	M. LIM.	4.8	6.9	6	5.8	0.2	0.2	0.8	9.7
50 --60	10 YR 5/4	10 YR 3/4	1.12	2.85	60.7	316	620	64	M. LIM.	4.5	6.6	7	7.7	0.2	0.1	0.8	1.31
60 --70	10 YR 5/4	10 YR 3/4	1.13	2.83	60.1	376	560	64	M. LIM.	4.6	6.6	8	8.7	0.3	0.1	0.9	14.8
70 --80	10 YR 5/4	10 YR 3/4	1.14	2.92	60.9	516	440	44	M. AR.	4.7	6.8	7	8.7	0.2	0.1	0.9	13.3
80 --90	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.15	2.81	59.1	576	360	64	M. AR.	4.8	6.8	8	7.7	0.2	0.1	0.7	13.3
90 --100	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.16	2.79	58.4	576	380	44	M. AR.	4.8	6.8	7	8.7	0.1	0.1	0.7	13.3
100--110	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.11	2.89	61.6	436	520	44	M. LIM.	4.8	6.8	7	7.7	0.3	0.1	0.9	14.5
110--120	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.14	2.77	58.8	376	560	46	M. LIM.	4.8	6.8	6	8.7	0.3	0.1	0.8	14.1
120--130	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.14	2.78	58.9	376	580	44	M. LIM.	4.8	6.7	4	8.7	0.2	0.1	0.8	14.8
130--140	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.15	2.83	38.2	456	500	44	M. LIM.	4.9	6.6	4	8.7	0.2	0.2	0.9	15.3
140--150	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.14	2.82	59.6	456	500	44	M. LIM.	5.1	6.7	4	10.6	0.2	0.2	0.8	14.4

*

10 YR 3/3 = pardo oscuro
 10 YR 3/4 = pardo amarillento oscuro
 10 YR 5/4 = pardo amarillento
 10 YR 6/4 = pardo claro amarillento

**

M. = migajón
 LIM. = limoso
 AR. = arenoso
 P = porosidad

El suelo se clasifica como Typic Ustorthent, por tener régimen de humedad ústico, epipedón ócrico y más de 150 cm de profundidad, los colores en húmedo van de pardo rojizo oscuro (5YR 3/3) a gris rojizo oscuro (5 YR 4/2). El análisis por difracción de rayos-X demuestra la presencia de hematita, originando los colores rojizos en todo el perfil (Tabla 17).

A pesar que el cultivo de cacahuate pertenece al grupo de las oleaginosas (con 497 g kg⁻¹ en grasa total), su acumulación en el suelo es mínimo ya que sólo se registraran valores de 0.33 a 0.11 g kg⁻¹ de extracto lipídico (Tabla 13), por lo que el rango es semejante al establecido para en otro sitios de muestreo.

El Perfil 4 fue muestreado en el municipio de Coyuca de Benítez, Guerrero, el cual forma parte de la llanura costera conocida como Costa Grande, que se inicia en la Bahía de Acapulco y termina en los límites del Estado de Michoacán; se caracteriza por tener un clima semihúmedo, con un largo periodo de sequedad bien diferenciado y material parental de aluvión (Secretaría de Gobernación y Gobierno de Guerrero, 1988). El suelo se clasifica como Typic Ustipsamment, adecuado para el desarrollo del cultivo de Coco, ya que se trata de suelos profundos, bien drenados; con el dominio de la fracción arena, con pH que tienden a la neutralidad de 6.7 a 7.1 en H₂O (1:5) (Tabla 18).

Los litorales del Estado de Guerrero se caracterizan por registrar los mayores rendimientos en el fruto de coco, además de considerarse como un producto rico en aceite. En el año de 2002 alcanzó un valor de producción nacional de \$750,608,859.50 superior al ajonjolí (\$104,427,925.46) y cacahuate (\$328,984,660.57) por lo que es considerado como uno de los productos más rentables de la región (http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comagri.html).

La mayor distribución del extracto lipídico se concentra en la profundidad de 0-10 cm (Tabla 14), con 0.36 g kg⁻¹, como puede observarse existe una disminución gradual a partir de los 20

Tabla 19. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 5 (Typic Eutrudept), Cunduacán, Tabasco, cultivado con *Theobroma cacao*.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. Limo Arc.			Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ K ⁺		CIC
	Seco	Húmedo				g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹							Cmol ⁽⁺⁾ kg ⁻¹		
0 -- 10	10 YR 5/2	10 YR 3/2	0.93	2.57	63.8	52	696	252	M. LIM.	5.2	7.1	63	23.1	7.7	0.4	0.8	33.5
10 -- 20	10 YR 5/3	10 YR 3/3	1.08	2.69	59.9	51	737	212	M. LIM.	5.2	7.1	18	21.2	9.6	0.3	0.8	28.8
20 -- 30	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.11	2.69	58.7	71	737	192	M. LIM.	5.1	6.9	15	18.3	7.7	0.2	0.9	27.5
30 --40	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.09	2.52	56.7	71	753	176	M. LIM.	4.9	6.9	8	17.3	10.6	0.2	0.9	26.1
40 -- 50	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.18	2.65	55.5	112	752	136	M. LIM.	4.9	6.8	7	13.5	8.7	0.2	0.7	19.4
50 -- 60	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.16	2.73	57.5	151	713	136	M. LIM.	4.8	6.7	6	13.5	7.7	0.2	0.7	18.7
60 --70	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.23	2.78	55.8	172	712	113	M. LIM.	4.6	7.1	6	13.5	5.8	0.2	0.9	19.8
70 -- 80	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.22	2.69	54.6	292	532	176	M. LIM.	4.5	6.7	5	13.5	9.6	0.2	0.9	23.6
80 -- 90	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.26	2.73	57.5	52	712	236	M. LIM.	5.2	7.1	9	19.3	1.9	0.3	0.9	27.4
90 --100	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.21	2.65	58.1	31	793	236	M. LIM.	5.6	7.3	9	20.2	8.7	0.3	0.8	27.7
100--110	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.25	2.63	56.3	12	812	176	M. LIM.	6.5	7.9	6	18.3	10.6	0.2	0.9	26.6

*

10 YR 3/2 = pardo grisáceo muy oscuro
 10 YR 3/3 = pardo oscuro
 10 YR 3/4 = pardo amarillento oscuro
 10 YR 5/2 = pardo grisáceo
 10 YR 5/3 = pardo
 10 YR 6/4 = pardo amarillento claro

**

M. = migajón
 LIM. = limoso
 P = porosidad

cm de profundidad, dominando siempre los lípidos libres sobre los ligados. Los rangos que se obtuvieron están muy cercanos a los registrados en los demás perfiles estudiados.

Las relaciones C/N están por debajo de 8, por lo que existe un dominio de la descomposición sobre el enriquecimiento de compuestos orgánicos. Al mismo tiempo la temperatura media anual (26 °C) de la zona puede acelerar este proceso.

Los Perfiles 5, 6 y 7 se encuentran en el Estado de Tabasco, la región conjuga una serie de factores que la hace la más lluviosa de México, tales como: su ubicación en la zona tropical, el relieve plano con escasa altitud y la cercanía al mar (INEGI, 1986). Los Perfiles 5 y 7 se muestrearon en zonas cálidas húmedas y se seleccionaron por sus antecedentes en la producción de cacao, el cacaotal es considerado como un agroecosistema complejo, en donde pueden interaccionar diferentes especies perennes, el propio árbol de cacao y los árboles de sombra (Alonso, 1987).

El Perfil 5 se localiza en el Rancho Oasis del municipio de Cunduacán, la vegetación que se desarrolla es de bosque tropical perennifolio, el relieve es escaso, casi plano, con altitud de 30 msnm, temperatura media anual de 27 °C y precipitación anual de 2125 mm. Es una planicie sedimentaria cuyo origen está íntimamente relacionado con la regresión del Atlántico, en el Terciario inferior. Los depósitos más antiguos son del Terciario inferior, que son de alternancia rítmica de capas clásticas (lutita-arenisca-limonitas-conglomerados); sobreyacen concordantemente sobre rocas carbonatadas del Cretácico superior y marcan un cambio de un ambiente marino de plataforma continental a un ambiente litoral (INEGI, 1986; SPP, 1977a).

A partir de las pruebas de campo y los análisis de laboratorio, los suelos se clasificaron como Typic Eutrudept; los análisis físicos y químicos del Perfil 5 (Tabla 19) indican que la clase textural (migajón limoso), se mantiene constante a lo largo del Perfil y con pocos cambios en

Tabla 20. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 6 (Typic Eutrudept), Puyacatengo, Tabasco, cultivado con *Cynodon spp.*

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. g kg ⁻¹	Limo	Arc.	Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo															
0 -- 10	10 YR 5/3	10 YR 3/2	1.07	2.66	58.7	506	260	234	M ARC AR	5.1	6.1	47	12.5	2.9	0.6	0.9	20.9
10 -- 20	10 YR 5/3	10 YR 3/2	1.13	2.68	59.1	464	300	236	FRANCO	4.4	5.8	26	9.6	3.9	0.4	0.9	17.5
20 -- 30	10 YR 5/4	10 YR 3/3	1.07	2.66	59.8	444	340	216	M. ARC.	4.2	5.8	16	11.6	5.8	0.3	0.8	16.4
30 --40	10 YR 5/4	10 YR 3/4	1.11	2.77	59.9	384	300	316	FRANCO	4.3	5.7	15	11.2	5.8	0.4	0.7	17.3
40 -- 50	10 YR 5/4	10 YR 3/4	1.18	2.61	54.8	424	320	256	FRANCO	4.1	6.1	12	9.6	3.9	0.5	0.9	16.7
50 -- 60	10 YR 6/4	10 YR 3/6	1.21	2.71	52.7	364	340	296	M. ARC.	4.2	6.1	13	11.2	5.8	0.6	0.9	19.1
60 --70	10 YR 6/4	10 YR 3/6	1.24	2.64	53.1	366	320	314	M. ARC.	4.3	6.3	11	11.2	5.8	0.6	0.8	20.1

*

10 YR 3/2 = pardo gris muy oscuro
 10 YR 3/3 = pardo oscuro
 10 YR 3/4; 3/6 = pardo amarillento oscuro
 10 YR 5/3 = pardo
 10 YR 5/4 = pardo amarillento
 10 YR 6/4 = pardo amarillento claro

**

M. = migajón
 AR. = arenoso
 ARC. = arcilloso
 P = porosidad

el color tanto en seco como en húmedo: puede observarse que la MOS tiene su mayor efecto en los primeros 30 cm, ya que en estas profundidades los colores del suelo son ligeramente más oscuros. El pH del suelo tanto en KCl como en H₂O se mantiene irregular a lo largo del perfil, aunque tiende a la neutralidad y está muy relacionado con los aportes fluviales.

El extracto lipídico del suelo (0-10 cm) es muy cercano al valor registrado para el cultivo del ajonjolí con 0.40 g kg⁻¹, a pesar que el COT del Perfil 5, supera por ocho veces más al Perfil 2, por lo que los factores ambientales pudieron jugar un papel importante en la degradación de estos compuestos. Las relaciones C/N de 5, indican que en estos suelos existe una intensa descomposición de los productos orgánicos, al mismo tiempo los contenidos de lípidos totales decrecen gradualmente con las relaciones C/N. Con lo anterior puede decirse que los contenidos del extracto lipídico de los suelos están influenciados fuertemente por la relación de descomposición y de incorporación en las diferentes profundidades.

Tanto en el Perfil 5 como en el 7, puede observarse que en la profundidad de 10 a 20 cm, los lípidos ligados aumentan ligeramente sobre los lípidos libres; esta relación puede atribuirse al aumento de la población microbiana a estas profundidades del suelo, ya que los microorganismos participan significativamente en la incorporación de los ácidos grasos en las sustancias húmicas. En particular el cultivo de cacao se caracteriza por su amplia distribución de raíces, finas y medias, favoreciendo la actividad microbiana en su área de influencia. Por lo que los productos microbianos de naturaleza lipídica pueden llegar a incorporarse al humus sin experimentar extrema degradación (Wagner y Muzorewa, 1977; González-Vila *et al.*, 1985).

Los Perfiles 6 y 7 se localizan en Puyacatengo al sureste del Estado de Tabasco; configurado de montañas plegadas formadas por un grueso paquete de calizas del Cretácico superior. La

Tabla 21. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 7 (Typic Eutrudept), Puyacatengo, Tabasco, cultivado con *Theobroma cacao*.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. g kg ⁻¹	Limo g kg ⁻¹	Arc.	Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo															
0 -- 10	10 YR 5/3	10 YR 3/2	1.07	2.71	60.5	365	341	294	M. ARC.	4.8	6.1	45	14.4	4.8	0.3	0.9	21.8
10 -- 20	10 YR 6/3	10 YR 3/3	1.11	2.74	59.5	364	341	295	M. ARC.	4.4	6.1	25	15.3	4.1	0.3	0.9	21.6
20 -- 30	10 YR 6/4	10 YR 3/3	1.15	2.68	57.1	365	341	294	M. ARC.	4.2	5.9	16	12.5	2.8	0.2	0.9	19.4
30 --40	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.16	2.63	55.9	365	359	276	M. ARC.	4.2	5.9	11	10.6	4.8	0.2	0.6	21.2
40 -- 50	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.19	2.65	55.1	405	319	276	M. ARC.	4.2	5.9	9	11.6	9.6	0.2	0.6	22.1
50 -- 60	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.19	2.68	55.6	324	338	338	M. ARC.	4.2	6.1	8	9.6	8.9	0.2	0.6	24.7
60 --70	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.15	2.69	57.2	365	319	316	M. ARC.	4.1	6.1	9	13.5	1.9	0.2	0.6	25.5
70 -- 80	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.15	2.64	56.4	405	339	256	FRANCO	4.1	5.8	9	13.7	7.9	0.3	0.5	25.7
80 -- 90	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.17	2.59	54.8	425	319	256	FRANCO	4.1	5.8	7	15.8	10.5	0.3	0.7	28.2
90 --100	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.13	2.54	55.5	545	239	216	M ARC AR	4.1	5.8	6	15.2	5.8	0.3	0.7	25.9
100--110	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.14	2.58	55.8	464	258	278	M ARC AR	4.1	5.9	4	15.2	5.8	0.3	0.7	26.2
110--120	10 YR 6/4	10 YR 3/4	1.16	2.62	55.6	545	261	194	M ARC AR	4.1	6.1	5	14.1	7.4	0.3	0.7	27.1

*

10 YR 3/2 = pardo gris muy oscuro
 10 YR 3/3 = pardo oscuro
 10 YR 3/4 = pardo amarillento oscuro
 10 YR 5/3 = pardo
 10 YR 6/3 = pardo pálido
 10 YR 6/4 = pardo amarillento claro

**

M. = migajón
 AR. = arenoso
 ARC. = arcilloso
 P = porosidad

altitud de estos elementos topográficos varía de 200 a 500 m, siendo afectados por una intensa erosión fluvial. Sin embargo, la adición de rocas andesíticas indica un rejuvenecimiento incipiente en la zona. La vegetación que comúnmente se desarrolla es el bosque tropical perennifolio, que en algunas zonas es secundaria y en otras ha sido substituida en su totalidad por pastizales (INEGI, 1986; INEGI, 1990). El Perfil 6 fue muestreado en una zona donde la cubierta vegetal original correspondió a bosque tropical perennifolio, substituyéndose por plantación de cacao y recientemente por la de pastizal. La MOS presenta valores de 47 a 11 g kg⁻¹ se manifiesta principalmente en los primeros 20 cm, ya que el color presenta tonos más oscuros. La clase textural es irregular en todo el perfil, relacionándose directamente con los aportes fluviales, durante su formación. Los valores del pH se mantienen por debajo de 7, a pesar que existen calizas en las zonas más elevadas, al mismo tiempo tanto en laboratorio como en campo no se observa reacción al HCl. Lo anterior es el resultado de la precipitación elevada de la zona, ya que se registran valores de 3593 mm, causando su desbasificación.

Los perfiles 6 y 7 se clasifican como Typic Eutrudept (Tablas 20 y 21 respectivamente), ya que coinciden en sus factores ambientales, así como en sus propiedades físicas y químicas. La principal diferencia se manifiesta en la profundidad del Perfil 6 con 70 cm de profundidad y el Perfil 7 con 120 cm.

Sólo el extracto lipídico total, manifiesta diferencias entre ambos perfiles; por ejemplo, en el Perfil 6 cultivado con pastizal, se registran los valores más bajos, a diferencia del Perfil 7, que logra detectarse 0.97 g kg⁻¹ para la profundidad de 30 a 40 cm. De manera general, para ambos perfiles se observa una recuperación importante a partir de los 40 cm de profundidad, en donde la biomasa de raíces favorece nuevamente la acumulación de los grupos lipídicos (Tablas 23 y 24). Por considerarse al cacao como una fuente importante de grasa vegetal (495

Tabla 22. Composición química y distribución de lípidos en el Perfil 5, con cultivo de cacao.

Prof. cm	C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	Lípidos (g kg ⁻¹)		
					Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	36	7.0	5	0.12	0.19	0.21	0.40
10 -- 20	11	2.1	5	0.05	0.11	0.16	0.27
20 -- 30	9	1.8	5	0.03	0.08	0.02	0.10
30 --40	5	1.1	5	0.02	0.08	0.03	0.11

Tabla 23. Composición química y distribución de lípidos en el Perfil 6, con pastizal.

Prof. cm	C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	Lípidos (g kg ⁻¹)		
					Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	27	4.8	6	0.06	0.17	0.11	0.28
10 -- 20	15	3.1	5	0.04	0.11	0.06	0.17
20 -- 30	9	2.6	3	0.02	0.11	0.04	0.15
30 --40	9	1.7	5	0.02	0.18	0.07	0.25

Tabla 24. Composición química y distribución de lípidos en el Perfil 7, con cultivo de cacao.

Prof. cm	C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	C/N	P g kg ⁻¹	Lípidos (g kg ⁻¹)		
					Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	26	4.6	6	0.06	0.19	0.14	0.33
10 -- 20	14	3.1	5	0.05	0.09	0.12	0.21
20 -- 30	9	2.5	4	0.03	0.75	0.08	0.83
30 --40	7	1.8	4	0.05	0.94	0.03	0.97

g kg⁻¹). se esperaría una importante incorporación al suelo de estos compuestos; sin embargo, los factores abióticos, como la temperatura y precipitación, aceleran posiblemente la degradación de estos compuestos.

Los Perfiles 8 y 9 se encuentran en el Estado de Michoacán en la provincia del Eje Neovolcánico, con rocas volcánicas jóvenes del Cenozoico superior. Existen conos cineríticos, aparatos volcánicos, domos complejos riolíticos y andesíticos, coladas de lava basáltica y depósitos piroclásticos. La composición de las lavas varía desde basalto hasta andesita y dacita. Los volcanes se alinean a largo de fallas regionales orientadas noroeste-sureste, producto de la tensión. Su hidrografía está constituida principalmente por el río Duero e importantes manantiales. La zona se caracteriza por un clima semicálido subhúmedo con lluvias en verano, con porcentaje invernal menor de 5; el Perfil 8 con temperatura media anual de 17.7 °C y precipitación anual de 894.7 y el Perfil 9 con 18 °C y 1034.8 mm de precipitación anual. (García, 1981; INEGI, 1985).

El Perfil 8 se colectó en el municipio de Chilchota, Michoacán, localizado en una cañada, en donde las condiciones de humedad que prevalecen son adecuadas para el cultivo de aguacate, la mayoría de los huertos tienen más de 40 años de establecidos. En el perfil no existe un cambio importante en el color, en condiciones húmedas el color del suelo se mantiene homogéneo, a pesar que en las primeras profundidades la MOS se encuentra en mayor proporción, especialmente en los primeros 10 cm (63 g kg⁻¹) (Tabla 25). La densidad aparente se mantiene por debajo de 0.89 Mg m³ en los primeros 30 cm, aunque después aparecen fluctuaciones entre 0.94 a 1.04 Mg m³ como máximo.

El Perfil 8 se clasifica como Alfic Haplustand, los niveles de arcilla se encuentran ampliamente distribuidos en todo el perfil; a través del perfil se presentan propiedades ándicas,

Tabla 25. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 8 (Alfic Haplustand), Tanaquillo, Chilchota, Michoacán, cultivado con *Persea americana*.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. Limo Arc.			Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	pH NaF 1N	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo				g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹										
0 --10	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.87	2.53	61.7	345	541	114	M. LIM.	5.8	6.5	9.9	63	17.9	10.5	1.7	0.5	37.1
10 --20	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.87	2.69	60.6	343	501	156	M. LIM.	5.7	6.6	10.0	23	12.6	8.4	1.4	0.7	28.4
20 --30	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.88	2.55	60.1	203	501	296	M. LIM.	5.5	6.9	9.9	18	13.1	9.5	1.6	0.5	27.9
30 --40	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.90	2.51	61.8	185	416	401	ARCILLA LIM.	5.4	6.9	10.1	19	13.7	10.5	1.4	0.8	28.6
40 --50	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.94	2.51	62.5	184	458	358	M. ARC. LIM.	5.3	6.9	10.1	19	14.1	7.9	0.9	0.7	28.9
50 --60	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.96	2.53	62.1	184	518	298	M. ARC. LIM.	5.4	7.1	10.0	15	13.1	11.1	0.4	0.9	30.5
60 --70	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.97	2.49	61.1	184	538	278	M. ARC. LIM.	5.5	7.1	9.9	18	12.6	10.5	0.3	0.9	27.6
70 --80	10 YR 4/4	10 YR 2/2	1.03	2.57	59.9	203	501	296	M. ARC.	5.6	7.1	9.9	20	11.6	8.4	0.3	0.9	22.6
80 --90	10 YR 5/4	10 YR 2/2	1.04	2.49	58.2	203	461	336	M. ARC.	5.6	7.2	10.1	20	13.7	7.4	0.3	0.9	23.9
90 --100	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.95	2.52	62.3	204	395	401	M. ARC.	5.6	7.2	9.9	22	14.7	7.9	0.3	0.9	26.3
100--110	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.95	2.52	62.3	224	418	358	M. ARC.	5.7	7.2	9.9	21	14.7	8.9	0.3	0.9	27.2
110--120	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.98	2.47	60.3	223	421	356	M. ARC.	5.7	7.3	9.9	21	15.3	6.6	0.4	1.2	26.4
120--130	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.97	2.47	60.7	222	402	376	M. ARC.	5.8	7.3	10.1	21	14.3	10.2	0.4	1.3	27.1
130--140	10 YR 4/4	10 YR 2/2	1.02	2.49	59.1	283	341	376	M. ARC.	5.9	7.3	10.0	23	12.8	8.7	0.3	1.2	26.8
140--150	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.99	2.55	61.7	183	401	416	ARCILLA LIM.	6.1	7.4	9.9	19	13.3	8.7	0.4	1.3	27.1
150--160	10 YR 5/4	10 YR 2/2	1.01	2.42	58.3	142	462	396	ARCILLA	6.1	7.4	10.1	18	12.8	8.7	0.4	1.2	25.7
160--170	10 YR 5/4	10 YR 2/2	1.03	2.46	58.1	162	382	456	ARCILLA	6.1	7.4	9.9	15	12.2	8.7	0.4	1.2	26.1

*

10 YR 2/2 = pardo muy oscuro
 10 YR 4/4 = pardo amarillento oscuro
 10 YR 5/4 = pardo amarillento

**

M. = migajón P = porosidad
 LIM. = limoso
 ARC. = arcilloso

ya que la determinación de pH con NaF 1 *N*, se establece entre 9.9 a 10.1 y además se detecta la presencia de alofano en todas las profundidades, aunque la mayor reacción se registra después de los 20 cm de profundidad.

El análisis por difracción de rayos X (DR-X) indica que existe una cantidad importante de minerales de rango corto, detectándose la presencia de imogolita (ver Capítulo 4). Los suelos tienden a la neutralidad ya que el pH con H₂O destilada en relación 1:5, se establece entre 6.5 a 7.4. Al mismo tiempo, las bases intercambiables indican que se trata de suelos saturados. En relación al contenido de lípidos, se observa que el grupo de los libres (0.12 a 0.25 g kg⁻¹) se duplica o en ocasiones supera al contenido de lípidos ligados (0.03-0.11 g kg⁻¹), por lo que la participación de la fracción coloidal en el enlace o retención de compuestos lipídicos es mínima (Tabla 26). Debe mencionarse que las relaciones C/N se encuentran por debajo de 10 (entre 6 a 7), por lo que en los suelos domina la tendencia a la mineralización de los compuestos orgánicos.

Por otro lado, los aportes del cultivo de aguacate, en grasa total (184 g kg⁻¹) son mínimas, esto si se comparan con los demás cultivos, considerados para esta investigación. Sin embargo, debe resaltarse, que el cultivo de aguacate favorece la estabilidad de los suelos, ya que la abundancia de raíces que van de gruesas a finas, participan en la agregación del suelo (Narro, 1994).

El Perfil 9, se localiza en el valle de Tangancícuaro, en el municipio con el mismo nombre; el uso actual de estos suelos corresponde al de agricultura intensiva, donde el agua de riego en la zona es de excelente calidad, algunos cultivos que se obtienen corresponden a productos de exportación como la fresa, frambuesa, brócoli, entre otros.

Tabla 26. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 8, con cultivo de aguacate.

Prof. cm	C	N	C/N	P	Lípidos (g kg ⁻¹)		
	g kg ⁻¹			g kg ⁻¹	Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	36	5	7	0.195	0.25	0.11	0.36
10 -- 20	13	2	7	0.090	0.27	0.11	0.38
20 -- 30	11	2	6	0.020	0.17	0.09	0.26
30 --40	11	2	6	0.012	0.12	0.03	0.15

Tabla 27. Composición química y extracto lipídico en el Perfil 9, con cultivo de brócoli.

Prof. cm	C	N	C/N	P	Lípidos (g kg ⁻¹)		
	g kg ⁻¹			g kg ⁻¹	Libres	Ligados	Totales
0 -- 10	32	5	6	263	0.21	0.12	0.33
10 -- 20	29	4	7	263	0.17	0.11	0.28
20 -- 30	25	3	8	245	0.25	0.11	0.36
30 --40	24	3	8	312	0.21	0.11	0.32
40 -- 50	18	n.d.	n.d.	254	0.25	0.09	0.34
50 -- 60	13	n.d.	nd	214	0.17	0.06	0.23
60 --70	12	n.d.	nd	178	0.08	0.04	0.12
70 -- 80	11	n.d.	nd	227	0.08	0.03	0.11
80 --90	7	n.d.	nd	205	0.07	0.03	0.10
90 --100	10	1	10	161	0.08	0.04	0.12

El suelo se clasifica como Vertic Thaptic Haplustand, identificándose los siguientes horizontes: Ap₁ (0-20 cm), Ap₂ (20-50 cm), 2A (50-110 cm) y 2C (110-130 cm). La descripción de campo (Apéndice I) indica que a partir de los 50 cm existe un cambio abrupto en el perfil, las pruebas de campo y de laboratorio corroboran propiedades vérticas, observándose claramente facetas de presión. Existe un cambio abrupto en la mayoría de las propiedades, ya que por ejemplo los colores en húmedo cambian de matiz 10 YR (en los primeros 40 cm de profundidad) a 7.5 YR (también en húmedo) a partir de los 50 cm; aumentando significativamente el contenido de arcilla entre 618 a 627 g kg⁻¹, así como las bases intercambiables. Se observa una tendencia a la alcalinidad (8.2 a 9.2 de pH) en función a la profundidad, al mismo tiempo se registra una elevada reacción al HCl, principalmente en las capas más profundas (Tabla 28).

Con respecto al contenido de MOS existe una disminución gradual con la profundidad, independientemente a la formación del suelo vértico. Lo anterior se ve reflejado en el extracto de lípidos totales (0.23 a 0.12 g kg⁻¹) (Tabla 27); los lípidos libres (0.17–0.08 g kg⁻¹) se mantienen siempre por arriba de los ligados (0.06–0.03 g kg⁻¹).

La primera sección del Perfil 9 (con 50 cm de profundidad) se caracteriza por presentar propiedades ándicas; por ejemplo, las densidades aparentes se presentan en el rango de 0.73 a 0.86 Mg m⁻³, se detecta la presencia de alofano, el pH con NaF 1 M entre 10.2 a 10.3, además se presenta en toda la sección la propiedad de tixotropía (Boul, 1981).

La parte superior del perfil, probablemente pudo originarse a partir de depósitos de materiales provenientes de las zonas más altas, ya que como se mencionó previamente el Valle forma parte del Eje Neovolcánico (INEGI, 1985). Los contenidos de MOS se mantienen casi constantes y disminuyen gradualmente con la profundidad del perfil. De esta manera los

Tabla 28. Resultados de los análisis físicos y químicos del Perfil 9 (Vertic Thaptic Haplustand), en el Valle de Tangancicuaro, Michoacán, cultivado con Brócoli.

Prof. cm	Color*		D.A. Mg m ⁻³	D.R.	P v/v	Are. Limo Arc.			Clase Textural**	pH KCl 1:5	pH H ₂ O 1:5	pH NaF 1N	M.O. g kg ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CIC
	Seco	Húmedo				g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹										
0 --10	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.88	2.32	62.1	144	501	355	M. ARC. LIM.	5.6	6.5	10.2	55	20.4	13.8	0.7	1.9	44.4
10 --20	10 YR 4/4	10 YR 2/2	0.85	2.33	63.5	102	462	436	ARCILLA LIM.	5.8	7.5	10.3	50	20.4	12.2	0.4	2.2	44.8
20 --30	10 YR 5/4	10 YR 3/2	0.74	2.43	69.5	151	522	327	M. ARC. LIM.	6.1	7.6	10.3	43	19.4	12.2	0.2	2.8	42.5
30 --40	10 YR 5/4	10 YR 3/2	0.73	2.35	68.9	91	582	327	M. ARC. LIM.	6.1	7.8	10.3	41	16.3	13.3	0.1	3.3	44.4
40 --50	10 YR 5/2	10 YR 3/2	0.86	2.36	63.5	11	422	467	ARCILLA LIM.	6.3	7.8	10.2	32	19.4	14.3	0.2	3.9	44.4
50 --60	10 YR 5/2 10 YR 5/4	7.5 YR 3/0 7.5 YR 3/2	1.09	2.32	53.1	31	342	627	ARCILLA	6.3	8.2	n.r.	22	24.5	15.8	0.2	4.1	48.6
60 --70	10 YR 5/1	7.5 YR 3/0	1.16	2.32	50.1	181	201	618	ARCILLA	6.5	8.1	n.r.	20	24.5	19.4	0.2	4.5	49.1
70 --80	7.5 YR 5/0	7.5 YR 2/0	1.15	2.32	50.4	144	238	618	ARCILLA	6.9	8.9	n.r.	19	24.5	22.4	0.2	4.6	51.3
80 --90	7.5 YR 5/0	7.5 YR 2/0	1.19	2.32	48.7	144	218	638	ARCILLA	7.2	9.1	n.r.	12	34.5	22.4	0.2	4.6	48.1
90 --100	7.5 YR 5/0	7.5 YR 2/0	1.07	2.32	53.9	144	221	637	ARCILLA	7.4	9.1	n.r.	17	36.7	21.9	0.2	4.7	53.2
100--110	7.5 YR 5/0	7.5 YR 2/0	0.98	2.31	57.6	184	198	618	ARCILLA	7.4	9.2	n.r.	10	45.9	24.5	0.3	4.8	53.9
110--120	7.5 YR 5/0	7.5 YR 4/0	0.94	2.32	59.4	401	221	378	M. ARC.	7.5	9.2	n.r.	8	53.1	20.4	0.4	4.7	51.9
120--130	7.5 YR 6/0 7.5 YR 7/0	7.5 YR 5/0 7.5 YR 6/0	1.04	2.51	58.6	482	402	116	FRANCO	7.6	9.2	n.r.	5	33.2	12.2	0.3	3.1	28.9

*	*	**	
10 YR 2/2 = pardo muy oscuro	7.5 YR 2/0; 4/0 = negro	M. = migajón	P = porosidad
10 YR 3/2 = pardo gris muy oscuro	7.5 YR 3/0 = negro	LIM. = limoso	n.r. = no registrado
10 YR 4/4 = pardo oscuro amarillento	7.5 YR 5/0 = gris	ARC. = arcilloso	
10 YR 5/1 = gris	7.5 YR 6/0 =		
10 YR 5/2 = pardo grisáceo	7.5 YR 7/0 = gris claro		
10 YR 5/4 = pardo amarillento			

valores se ven reflejados en el porcentaje de carbono orgánico total ($32-18 \text{ g kg}^{-1}$), nitrógeno total ($5-3 \text{ g kg}^{-1}$) y por consiguiente en el extracto de lípidos totales ($0.33-0.20 \text{ g kg}^{-1}$). A pesar que se trata de suelos con uso intensivo, los valores del extracto lipídico se mantienen muy cercanos a los que se detectaron en los demás perfiles, pudiendo ser el resultado de la conservación de la MOS.

Finalmente, en los suelos investigados con desarrollo genético, se observa que más del 90% del extracto lipídico se concentra en los primeros centímetros de los perfiles; algunos estudios realizados en Spodosoles presentaron el mismo comportamiento, concentrándose en los horizontes A_0 , A_1 y no en el horizonte B_h , como fue el caso de otros compuestos orgánicos. Con lo anterior podría pensarse que estas sustancias hidrofóbicas son poco móviles o en su caso pueden ser biodegradadas durante la migración como lo reportan estudios previos en *Ambès et al.*, (1983) y *Fridland* (1982).

Para visualizar los parámetros que describen mejor el comportamiento del extracto lipídico en los suelos estudiados, se consideraron todos los sitios de muestreo a la profundidad de 0-10 cm, de los perfiles y calicatas, dentro de un mismo análisis estadístico, ya que los suelos en su conjunto presentan un manejo agrícola en mayor o en menor intensidad.

En la Tabla 29, se muestran los coeficientes de correlación de Pearson que son usadas para calcular correlaciones entre el extracto lipídico total y los parámetros físicos y químicos del suelo con un nivel de significancia en $p < 0.05$. El extracto lipídico total presenta la mejor relación con el COT ($r = 0.78$) y la fracción arcilla ($r = 0.73$), lo anterior puede explicarse por la capacidad que tienen estos componentes en interaccionar en forma de órgano-minerales (*Kaiser y Guggenberger*, 2003 y *Theng*, 1974).

Tabla 29. Coeficientes de Correlación de Pearson entre el Extracto Lipídico Total y los parámetros físicos y químicos, del suelo (0-10 cm). Correlaciones marcadas con un nivel de significancia en $p < .0500$.

	Carbono	ELT	Nitrógeno	Fósforo	CICT	pH agua	Arcilla	Limo	DA
Carbono	1	total							
ELT	*0.78	1							
Nitrógeno	*0.90	0,55	1						
Fósforo	-0,05	-0,16	-0,05	1					
CICT	0,44	-0,01	*-0.74	0,17	1				
pH agua	0,06	-0,06	0,30	-0,20	0,53	1			
Arcilla	*0.73	*0.68	0,59	-0,06	0,08	-0,16	1		
Limo	-0,17	-0,44	-0,09	0,10	0,15	0,30	-0,36	1	
DA	*-0.90	-0,44	*-0.92	-0,10	*-0.68	-0,23	-0,53	-0,09	1

ELT= Extracto Lipídico Total

En el Análisis de Componentes Principales (ACP), se muestra el arreglo de los once sitios de muestreo (calicatas y perfiles) en donde se consideraron las variables ambientales, algunos parámetros del suelo, así como el extracto lipídico total (ELT), para las muestras superficiales (0-10 cm), con el fin de determinar cuales parámetros describen adecuadamente la distribución de los perfiles en los dos ejes.

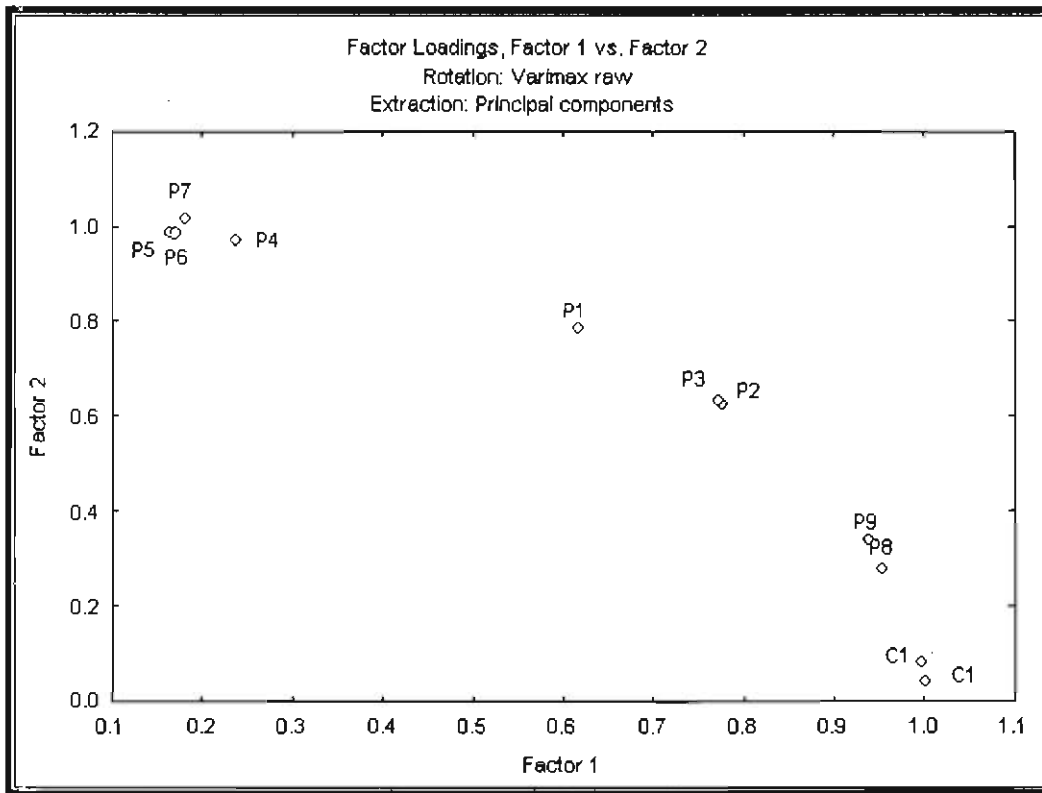


FIGURA 16. Análisis de Componentes Principales (ACP) en los sitios muestreados (0-10 cm de profundidad). Considerando los parámetros del suelo, ELT y las variables ambientales.

En el eje de las coordenadas, se muestra la distribución de los 11 perfiles, en donde el espacio está definido por dos ejes. El primer componente (Factor 1) está asociado al mayor valor

propio y es aquella que explica el mayor porcentaje posible de la varianza del sistema. La segunda está asociada al segundo valor propio, es aquella que explica el mayor porcentaje posible de la varianza residual.

El factor 1 incluye la mayor información con un porcentaje de varianza observada en datos de 46.41%, los mayores coeficientes correspondieron al COT, N, AH, temperatura, altitud y ELT; mientras que el factor 2 presenta 27.93% de varianza, donde participan en primer término el pH, pendiente, precipitación y la cubierta vegetal (perenne o temporal). Por lo tanto los modelos lineales (factor 1 y factor 2) explican conjuntamente el 74.35% de la variabilidad en los datos, el restante 25.75% es atribuible a factores desconocidos o no medidos.

La Figura 16 muestra una clara diferenciación del Perfil 1 (cultivado con cafeto), como resultado de los parámetros establecidos. Los grupos que se distribuyen en los dos factores o componentes, están relacionados directamente con las zonas geográficas de muestreo, con excepción del Perfil 4, el cual se acerca más a los perfiles del estado de Tabasco (5, 6 y 7), con excepción del Perfil 6, todos presentan una cubierta vegetal perenne.

En los andisoles (Perfiles 1, 8 y 9) el tiempo de residencia del carbono es alto, así como el grado de humificación, con contenidos significativos de COT (Harsh *et al.*, 2000): aunque es en el Perfil 1, donde se observan la mejor humificación de la MOS. Los cultivos perennes (cafeto, cocotal, cacaotal, aguacate) proporcionan mejores condiciones para la conservación del recurso suelo, en nuestro país, cada uno representan alternativas para ambientes diferentes, disminuyendo los riesgos de erosión, alcalinidad o acidez según sea el caso, pero principalmente la calidad de la MOS puede mantenerse por mayor tiempo.

El Análisis de Correlación Canónica (AC) es un procedimiento para encontrar la combinación lineal entre dos grupos de variables. Las variables del primero grupo están formadas por las variables explicativas (cobertura vegetal, temperatura, precipitación, altitud y pendiente) y el segundo por las variables explicadas (COT, ELT, nitrógeno, fósforo y pH). El análisis proporciona también coeficientes para cada variable que muestran el grado de importancia de cada una de ellas. Entre más alto sea el valor (negativo o positivo), mayor será la importancia de esa variable (Digby y Kempton, 1987) (Figura 17).

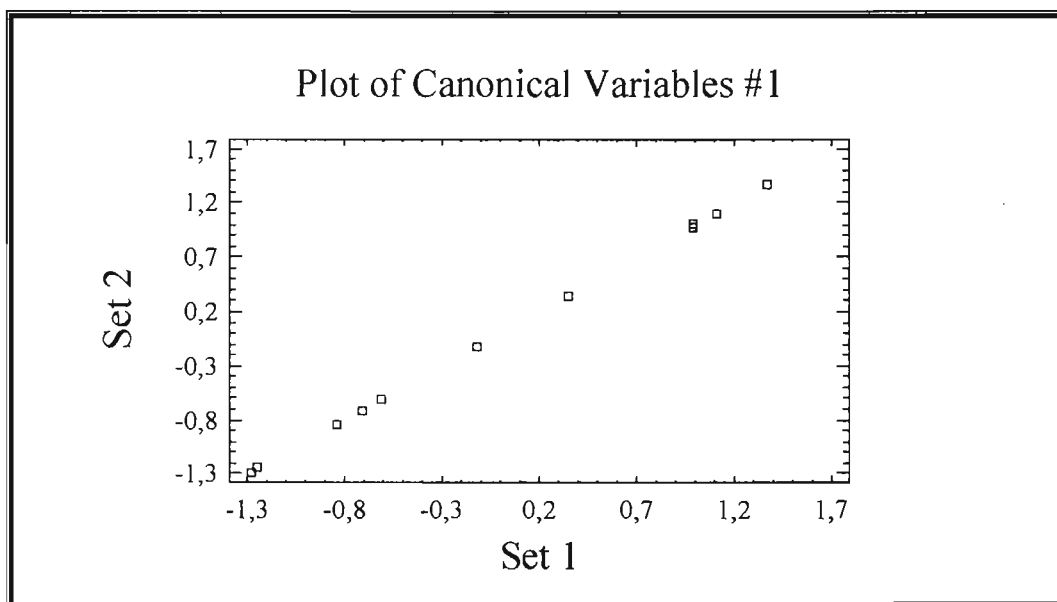


Figura 17. Relación de las variables ambientales (set 1) con los parámetros del suelo (set 2) en el Análisis de Correlación Canónica.

Las relaciones encontradas entre las variables ambientales y los parámetros del suelo, son altas, sobresaliendo la cobertura vegetal (0.98), altitud (0.94) y precipitación (0.52), para el

grupo 1. Para los parámetros del suelo, en orden de importancia son el COT (1.35), pH (-0.78), N (-0.67) y ELT (-0.53).

Con el análisis de correspondencia canónica AAC se pretende establecer relaciones entre los grupos de *n*-alcanos y *n*-ácidos grasos que son componentes del ELT, junto con variables ambientales y parámetros del suelo.

En las Figuras 18 y 19 se resumen los resultados de los ACC, en ambas figuras se incluyen dos ejes que explican la mayor varianza del sistema de variables estudiadas. En las Tablas 39 y 40 (Apéndice III) se presenta la varianza total explicativa de cada una de las variables para los tres primeros ejes. Para el grupo de los *n*-alcanos los mayores coeficientes de determinación se establecieron en el eje uno: el nitrógeno (N) con 44.89%, ácidos húmicos (AH) con 36.24% y temperatura con 20.79%. En el eje dos la variable que mejor explica la variación es la temperatura con 23.81%; la dirección de las flechas nos indica que ésta última variable parece estar negativamente correlacionada con el N y AH.

En la Figura 18 se observa que los AH y N están más relacionados con los *n*-alcanos de menor peso molecular (C_{17} a C_{21}) y ligeramente con el C_{15} y C_{16} . Por lo tanto los alcanos con menor peso molecular de origen microbiano están más relacionados con el N y los AH del suelo y por el contrario cuando la temperatura media anual disminuye, favorecen la presencia de *n*-alcanos de mayor peso molecular (C_{22} a C_{35}) que se originan de plantas superiores.

Para el grupo de los *n*-ácidos grasos las variables que influyen más en su distribución son la pendiente con 49.14 % de varianza, ELT con 45.29 % de varianza y el COT con 57.46% de varianza para el tercer eje, con tan sólo un eigenvalue de 6.1% (Figura 19). La dirección de las flechas nos indica que tienden a relacionarse más con los ácidos grasos de mayor peso molecular y por tanto con las plantas superiores como lo indican estudios previos (González-

CCA Alcanos

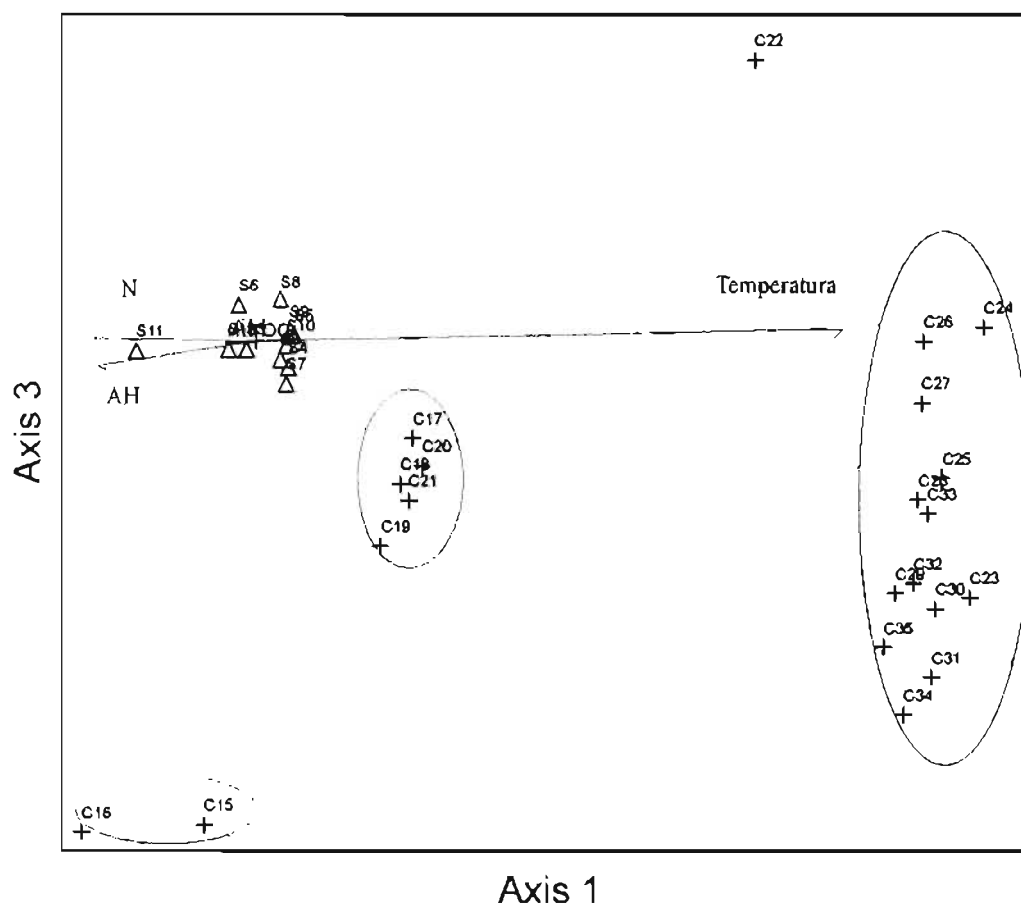


FIGURA 18. Representación de las variables ambientales y los parámetros del suelo en el primer y tercer eje canónico del ACC. Con tres grupos de alcanos según el número de carbonos (AH= ácidos húmicos; N= nitrógeno).

CCA Grasos

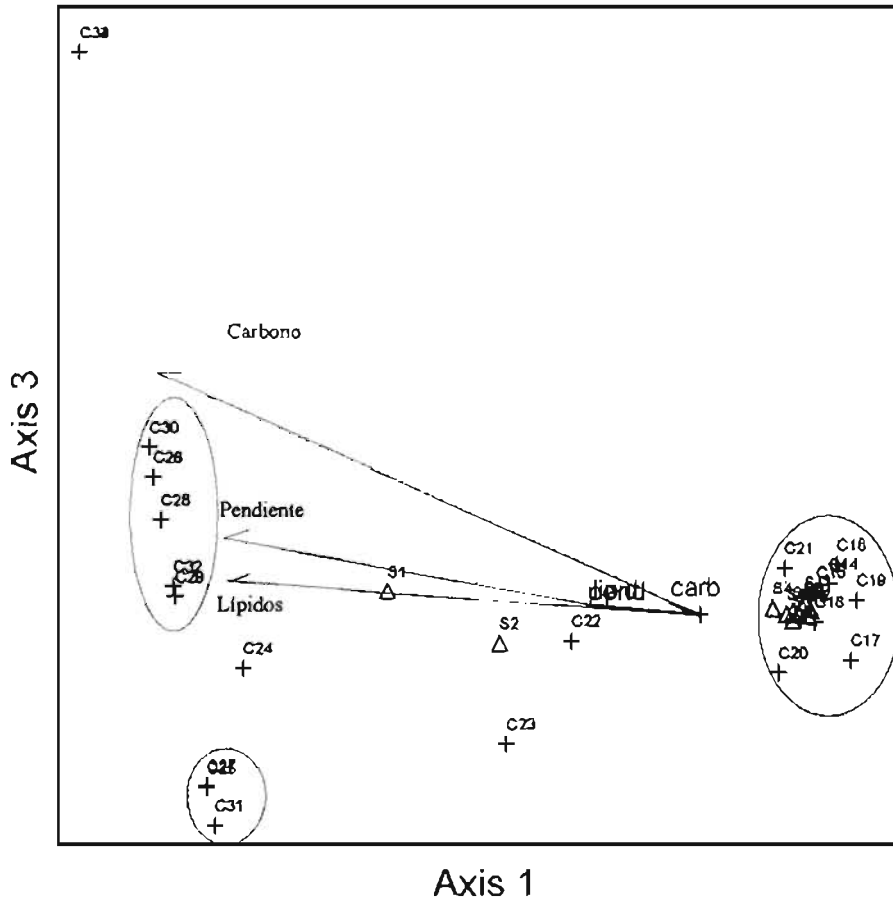


FIGURA 19. Representación de las variables ambientales y los parámetros del suelo en el primer y tercer eje canónico del ACC. Con tres grupos de ácidos grasos según el número de carbonos.

Vila *et al.*, 1996b y Jaffé *et al.*, 1996). Sin embargo debe considerarse que los tres coeficientes presentan signos negativos, por lo que a menor pendiente, y menores contenidos en el COT y ELT favorecen la presencia de *n*-ácidos grasos de mayor peso molecular.

Como puede observarse algunas de las variables ambientales (varias de ellas relacionados con los factores formadores del suelo), participan activamente en la distribución y diversidad del ELT en los suelos.

2. Identificación de los Extractos Lipídicos.

Para la identificación de los extractos lipídicos se realizó una selección previa sobre las muestras que registraron los valores más altos en porcentaje de extracto lipídico total (lípidos libres y ligados), coincidiendo con todas las muestras superficiales (0-10 cm), y donde se encuentra la mayor distribución de estos compuestos. Al mismo tiempo se consideraron las muestras más profundas de los suelos antropogénicos (Xochimilco y Tláhuac), ya que sus contenidos de lípidos se encontraron en rangos aceptables. Sin embargo, debe señalarse que para la identificación del extracto lipídico sólo se reporta la fracción libre, debido a que se observaron pequeñas diferencias entre ambos extractos.

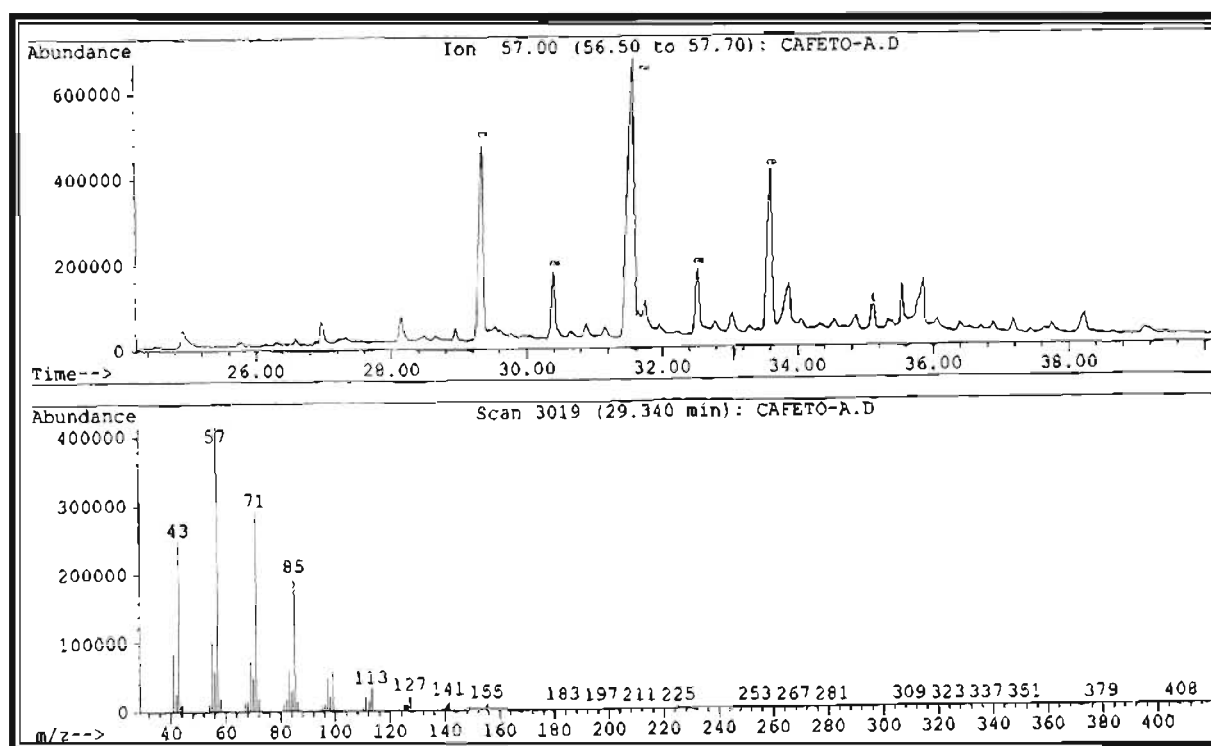


Figura 20. Cromatograma parcial del ion m/z 57 correspondiente a la serie homóloga de n -alcanos presentes en la fracción neutra y el espectro de masas del nonaeicosano (C_{29}), en los lípidos libres de suelos con cultivo de café.

En las Figuras 20, 21, 22 y 23 se presentan los cromatogramas parciales de los iones m/z 57, m/z 74, m/z 59, m/z 82, y sus fragmentos iónicos dominantes, además de sus series homólogas, variando el tiempo de retención y por consiguiente el peso molecular.

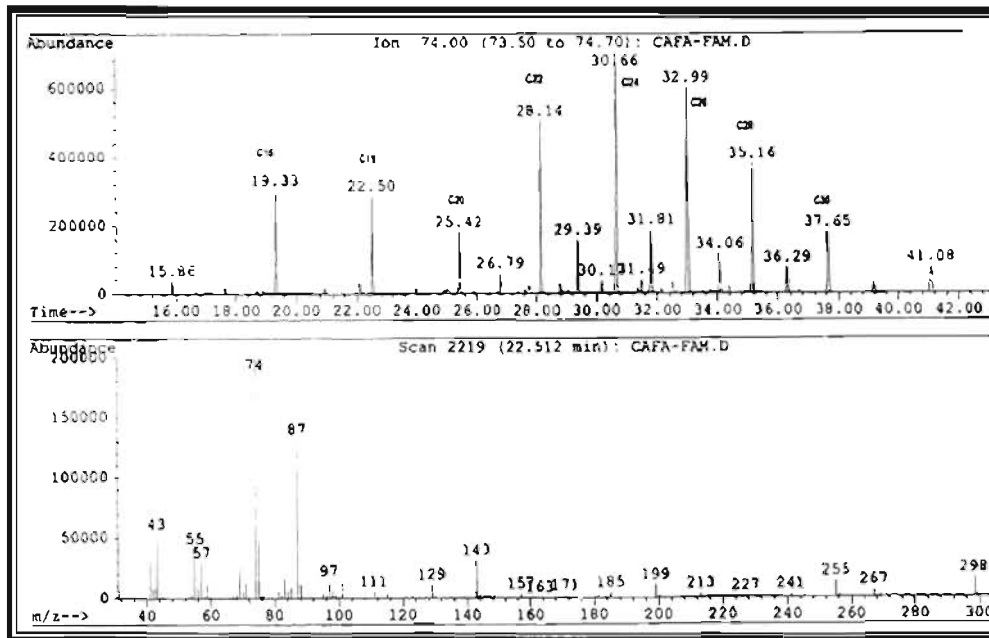


Figura 21. Cromatograma parcial del ion m/z 74 correspondiente a la serie homóloga de n -ácidos grasos presentes en la fracción ácida metilada y el espectro de masas del octadecanoico (C_{18}) en los lípidos libres de suelos con cultivo de café.

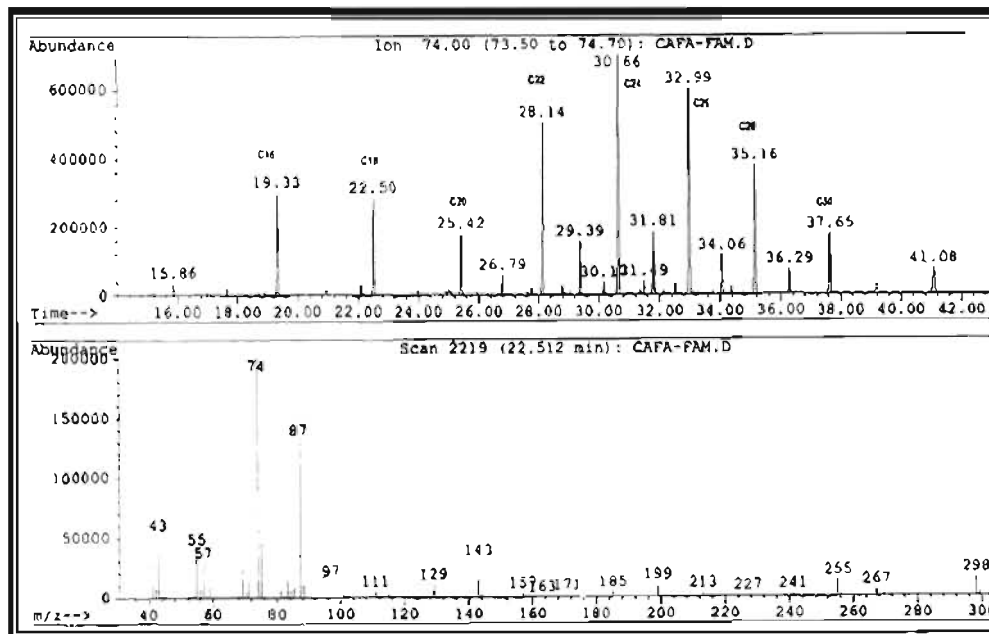


Figura 22. Cromatograma parcial del ion m/z 59 correspondiente a la serie homóloga de n -metilcetonas presentes en las muestras y el espectro de masas de la octaeicosanona (C_{28}) en los lípidos libres de suelos con cultivo de café.

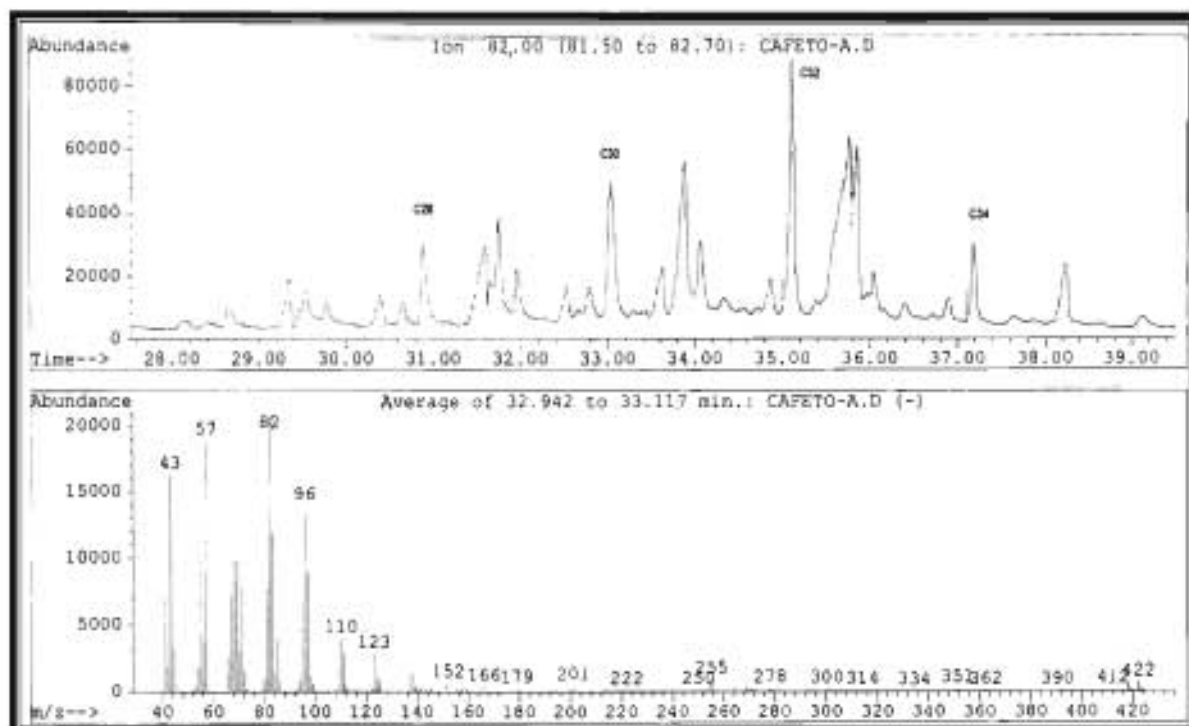


Figura 23. Cromatograma parcial del ion m/z 82 correspondiente a la serie homóloga de n -aldehídos presentes en las muestras y el espectro de masas del tricosanal (C_{30}) en los lípidos libres de suelos con cultivo de café.

Los compuestos identificados en los cuatro extractos lipídicos de la zona chinampera, se resumen en la Tabla 30, la distribución cuantitativa de las principales series homólogas se muestran en la Figura 24, para su presentación se consideró la abundancia relativa de los diferentes homólogos en los n -alcanos, n -ácidos grasos, n -metilcetonas y n -aldehídos. Los compuestos que presentaron la concentración máxima se consideraron como el 100% y los demás componentes se escalaron a 100.

Los extractos consistieron principalmente de n -alcanos y n -ácidos grasos con menores cantidades de otros compuestos biogénicos. La distribución de los n -alcanos en los diferentes suelos se muestran en el histograma de la Figura 24(a), éstos están presentes en el rango de C_{23} a C_{33} con una fuerte preferencia de carbonos impares sobre los pares. El homólogo dominante fue el C_{29} , sugiriendo el aporte a partir de ceras vegetales.

Tabla 30. Composición química del extracto lipídico libre en suelos bajo diferentes cultivos de la Calicata 1 (Xochimilco) y Calicata 2 (Tláhuac).

	Calicata 1 0 - 10 cm (Maíz)	Calicata 1 100 - 110 cm (Maíz)	Calicata 2 0 - 10 cm (Brócoli)	Calicata 2 170 - 180 cm (Brócoli)
<i>n</i> -Alcanos	C ₂₃ -C ₃₅	C ₂₅ -C ₃₃	C ₁₅ -C ₃₅	C ₂₅ -C ₃₃
<i>n</i> -ácidos grasos	C ₁₄ -C ₂₃	C ₁₄ -C ₂₂	C ₁₄ -C ₂₂	C ₁₄ -C ₂₂
<i>n</i> -metilcetonas	C ₂₃ -C ₃₃	C ₂₃ -C ₃₃	C ₂₃ -C ₃₃	C ₂₃ -C ₃₃
<i>n</i> -aldehídos	C ₂₆ -C ₃₅	C ₂₂ -C ₃₀	C ₂₄ -C ₂₈	tr
<i>n</i> -alcoholes	tr	tr	tr	C ₂₂ -C ₂₈
Otros*	Ph, Ad, Gt, Ta, Ar, Ch, St-one, Er-ol, Ol, 17 α	Ph, Gt, Ta, Va, Tri, St-one, Er-one, Ol Hop, 17 β	Ph, Ad, Gt, Ar, St-ol, Urs, Ol Hop	Ph, Ad, Va, Tri

*

Ph: Dialquil ftalato

Ad: Dioctil adipato

Gt: γ -Tocoferol

Ta: Taraxerol

Va: Vanillina

Ar: Aristolona

Tri: Tricosane-2,4-diona

Ch: Colest-4-en-3-ona

Er-ol: Ergoest-25-2n-3.5.6,12-terol (3- β) (Ergoesterol)

Er-one: (24S)-5- α ,ergoestan-3-ona

St-ol: Estigmaest-5-en-ol (3- β) (Estigmaesterol)

St-one: Estigmast-4-en-3-ona (Estigmaestenona)

Ol: Olean-12-en-3-ol, (3.beta) (β -Amirin)

Urs: Urs-12-en-3-ol, (3.beta) (α -Amirin)

HOPANOS:

17 β : 17 β (H),21 α (H)-moretano

17 α : 17 α (H),18 α (H)21 β (H)-28-30 Bisnorhopano

Hop: Hop-22(29)ano

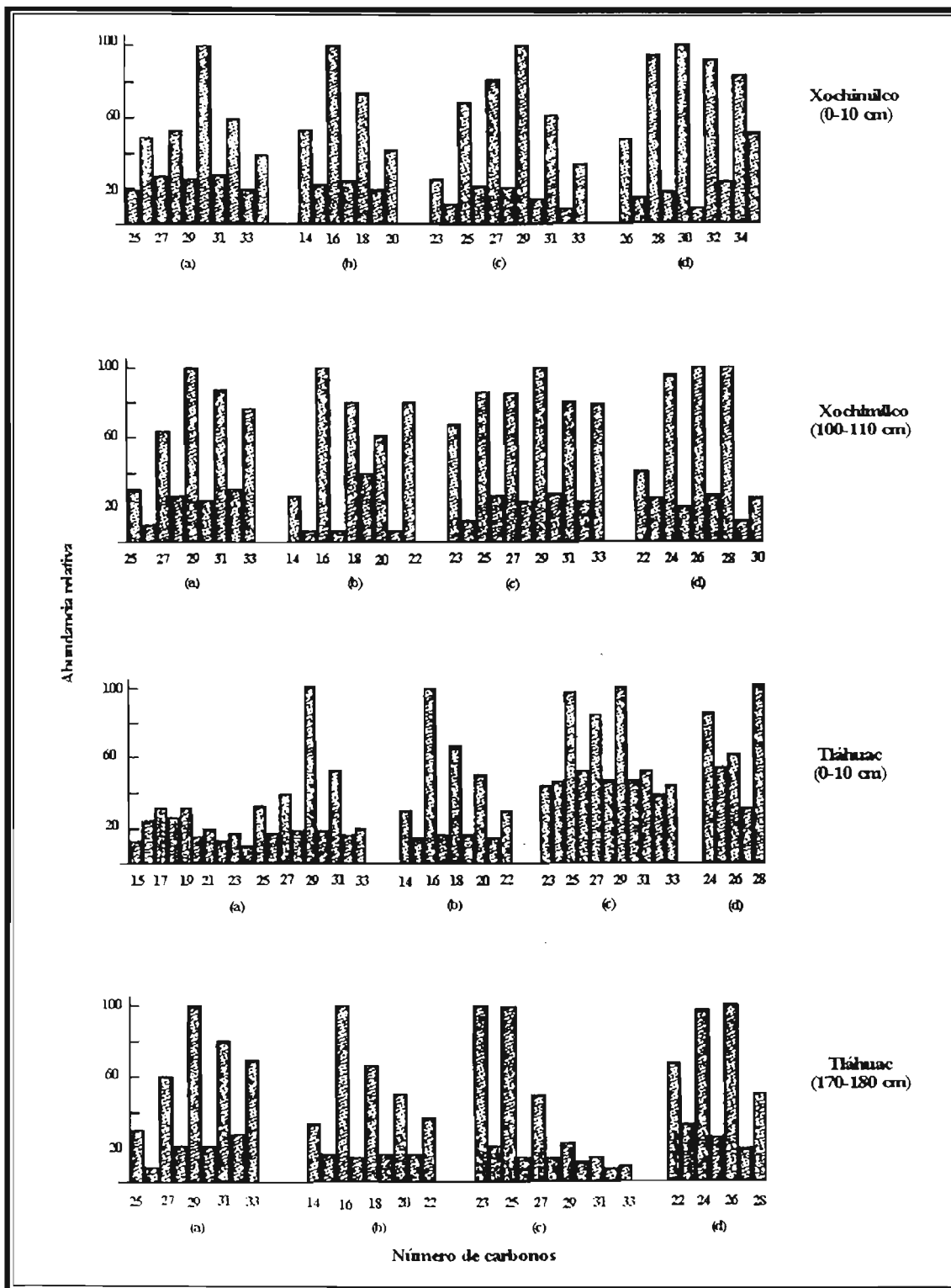


Figura 24. Series homólogas de: a) *n*-alcanos, b) *n*-ácidos grasos, c) *n*-metilcetonas y d) *n*-aldehídos, determinados en la fracción de lípidos libres de los suelos de Xochimilco y Tláhuac.

En Tláhuac los suelos mostraron una abundancia relativa mayor de *n*-alcanos, con pesos moleculares menores de C₂₀, los cuales probablemente se generaron a partir de la descarboxilación enzimática de los ácidos grasos del sitio (Lichtfouse, 1998c; Simoneit y Mazurek, 1982).

La distribución de los *n*-ácidos grasos se establecen entre C₁₄ a C₂₂, con una clara preferencia de carbonos pares sobre los impares, como puede observarse en la Figura 24(b). Debe señalarse que estas series surgen de los lípidos de plantas superiores. En la mayoría de las muestras el ácido graso C₁₆ fue el más abundante, ya que normalmente está presente en las membranas celulares de casi todos los organismos vivos.

Las *n*-metilcetonas en los suelos son el resultado de la β-oxidación *in situ* de los alcanos, así como de la descarboxilación de los ácidos grasos, por lo que estos compuestos podrían ser considerados como indicadores de la actividad microbiana de un suelo. En la Figura 24(c) se observan que el grupo de las metilcetonas se encuentra distribuido homogéneamente en todas las muestras entre C₂₃ a C₃₃, dominando los impares sobre los pares (Amblès *et al.*, 1993).

Dentro de los compuestos xenobióticos se identificaron el dialquil ftalato y dioctil adipato, los cuales provienen de plastificantes, ambos se encontraron en la mayoría de las muestras. Estos compuestos son considerados como moléculas ubicuas de origen antropogénico y han sido previamente identificadas en compostas de desechos urbanos (González-Vila *et al.*, 1992).

Los *n*-alcoholes con comportamiento graso, obtenidos en la fracción neutra, forman parte de las ceras en plantas superiores, predominan en el rango de C₂₄ a C₃₀, mientras que en

turbas su distribución se inclina hacia cadenas más cortas con el dominio de los homólogos C_{20} y C_{28} y como máximo el C_{22} (Del Río *et al.*, 1990). En sedimentos marinos se registran alcoholes de cadena larga, el C_{18} , C_{22} y C_{26} , con dominio de los pares sobre los impares (Marlow *et al.*, 2001). En este estudio los *n*-alcoholes grasos se identificaron únicamente en dos muestras, los valores correspondieron al rango de C_{22} a C_{28} para el suelo del municipio de Tláhuac, a una profundidad de 170-180 cm, y en contraste en la muestra superficial del suelo (0-10 cm) del Perfil 7 (Puyacatengo, Tabasco) se registraron los *n*-alcoholes que se encontraron entre C_{22} a C_{26} ; esta serie homóloga no presentó diferencias importantes en relación a la profundidad, cultivo y origen del suelo (Tabla 32).

Por otro lado, en las Tablas 31, 32 y 33 se presenta la composición química de los extractos lipídicos correspondientes a los suelos con desarrollo genético. Los perfiles fueron colectados en los estados de Guerrero, Tabasco y Michoacán.

En los Perfiles 1 (cultivado con cafeto), 2 (ajonjolí), 3 (cacahuate) y 4 (coco), los *n*-alcanos que se identificaron estuvieron en el rango de C_{15} a C_{35} dominados por los homólogos de cadena impar y con un predominio de los homólogos de C_{29} y C_{31} para todos los casos. La abundancia de los homólogos superiores (mayores de C_{23}) en todas las muestras sugiere un importante aporte de lípidos de plantas terrestres superiores (Del Río *et al.*, 1990) ya que los homólogos inferiores a C_{23} se han considerado como indicativos de origen algal o bacteriano (Gelpí *et al.*, 1970). Por lo tanto, debe mencionarse que la distribución de alcanos, de manera general fue relativamente uniforme, no permitiendo una clara diferenciación de los diversos sitios de muestreo.

Los ácidos grasos saturados y lineales provienen normalmente de plantas superiores y los homólogos insaturados de cadena corta están frecuentemente en los microorganismos del suelo; este último grupo tiene la propiedad de ser altamente reactivo (originando centros de

Tabla 31. Composición química del extracto lipídico libre en suelos (0-10 cm) bajo diferentes cultivos, del Estado de Guerrero.

	Perfil 1 (Cafetal)	Perfil 2 (Ajonjolí)	Perfil 3 (Cacahuate)	Perfil 4 (Cocotal)
<i>n</i> -alcanos	C ₁₇ -C ₃₅	C ₂₃ -C ₃₅	C ₁₅ -C ₃₅	C ₂₅ -C ₃₅
<i>n</i> -ácidos grasos	C ₁₄ -C ₃₄	C ₁₄ -C ₃₂	C ₁₄ -C ₂₂ , C _{18:1}	C ₁₄ -C ₂₄ , C _{18:1} (cis), C _{18:1} (trans)
<i>n</i> -metilcetonas	C ₂₅ -C ₃₅	C ₂₇ -C ₃₅	C ₂₅ -C ₃₅	C ₂₇ -C ₃₅
<i>n</i> -aldehidos	C ₂₈ -C ₃₄	C ₂₃ -C ₃₃	C ₂₃ -C ₃₃	C ₂₈ -C ₃₂
*Otros	Ph, Ch, Esc, St-one, Ol, Urs, No, Pri, Fi	Ph, Ad, Ar, Esc, Erg, St-en, St-ol, St-st, Urs, Norp, Sec, 17 α	Ph, Esc, St-ol, Ol, Urs, 17 α , 17 β	Ph, Gt, Pta, Ch, Ch-ol, Esc St-one, Hop, Sec:

*

Ph: Dialquil ftalato

Ad: Dioctil adipato

Gt: γ -Tocoferol

Pta: psi-Taraxerol

Ar: Aristolona

Tri: Tricosane-2,4-diona

Ch: Cholest-4-en-3-ona

Chol: Colest-5-en-3-ol (3 β)

Esc: 2,6,10,14,18,,22 tetracosahexano-2,6,15,19,20,23 hexametil (Escualeno)

Erg: (24R)-4-Ergoesten-3-ona

Erst: Ergoest-5-en-3-ol (3 β)

St-ol: Estigmast-5-en-ol (3- β) (Estigmasterol)

St-en: (24R)-4-estigmasten-3-ona

St-st: Estigmaest-5,22-dien-3-ol (3 β , 22E)

St-one: Estigmaest-4-en-3-one (Etigmaestenona)

Ol: Olean-12-en-3-ol, (3. β) (β -Amirin)

Urs: Urs-12-en-3-ol, (3. β) (α -Amirin)

No: Noruns-12-en

Pri: Pristano

Fi: Fitano

HOPANOS:

Norp: 30-norneohop-13(18)ano

17 α : 17 α (H),18 α (H)21 β (H)-28-30 Bisnorhopano

Hop: Hop-22(29)ene

17 β : 17 β (H),21 α (H)

Sec: 17,21-*sec*ohopano

reacción) y sujetos a la interacción entre ellos mismos o con otros productos biológicos (Breger, 1973; González-Vila, *et al.*, 1996b; Jaffé *et al.*, 1996). En los perfiles de Guerrero, el rango de los ácidos grasos lineales y saturados fue de C₁₄ a C₃₂, con el predominio de los homólogos con cadena par, esta serie presentó un máximo para los átomos de carbono C₁₆ y C₁₈. De la misma manera se identificaron algunos ácidos grasos insaturados C_{18:1(cis)}, C_{18:1(trans)}, en las muestras de suelos cultivados con cacahuate (Perfil 3), cocotal (Perfil 4) y pastizal (Perfil 6).

Las cetonas representan una pequeña proporción de los lípidos totales, las predominantes corresponden a las metilcetonas lineales, principalmente de origen microbiano y a cetonas triterpénicas cíclicas de plantas superiores (Amblès *et al.*, 1993).

Las *n*-metilcetonas de cadena corta (menor de C₂₄) son más susceptibles a la degradación; por lo que en la mayoría de los sitios muestreados se detectaron las de cadena larga, es decir se establecieron en el rango de C₂₃ a C₃₅, constituidos de homólogos unimodales, con predominancia de los impares y como máximos el C₂₉ y C₃₁, por lo que su origen puede considerarse de las plantas superiores.

En la Figura 25 se presentan las rutas de degradación que puede seguir el fitol, tanto en un ambiente óxico o como anóxico. Ambos compuestos isoprénicos son productos diagenéticos del fitol y no constituyentes primarios de los organismos (Simoneit, 1982).

Tanto el Pristano (Pr) como el Fitano (Fi) provienen principalmente de la cadena del fitol de la clorofila y en función del ambiente de deposición, dan lugar al pristano en ambiente oxidante o al fitano en ambiente reductor (Didyk *et al.*, 1978).

En los suelos cultivados bajo cafeto se registraron tanto el Pristano como el Fitano en la fracción neutra de los alcanos C₁₇ y C₁₈ respectivamente, observándose dos señales pequeñas en ambos casos (Marlow *et al.*, 2001). Su presencia no puede relacionarse con

Tabla 32. Composición química del extracto lipídico en suelos (0-10 cm) bajo diferentes cultivos, del Estado de Tabasco.

	Perfil 5 (Cacaotal)	Perfil 6 (Pastizal)	Perfil 7 (Cacaotal)
<i>n</i> -alcanos	C ₂₃ -C ₃₅	C ₁₇ -C ₃₅	C ₂₃ -C ₃₅
<i>n</i> -ácidos grasos	C ₁₄ -C ₂₂	C ₁₄ -C ₂₃ ; C _{18:1}	C ₁₄ -C ₂₂
<i>n</i> -metilcetonas	C ₂₇ -C ₃₅	C ₂₇ -C ₃₃	C ₂₅ -C ₃₃
<i>n</i> -aldehídos	C ₂₈ -C ₃₀	C ₂₂ -C ₃₀	C ₂₂ -C ₃₅
<i>n</i> -alcohol	tr	tr	C ₂₂ -C ₂₆
*Otros	Ph, Ad, Gt, St-one	Ph, Gt, Ar, St-one, Esc, St-ol, St-st	Ph, Gt, Ar, Esc, St-one, St-ol, St-st, Urs, Sec,

*

Ph: Dialquil ftalato

Ad: Dioctil adipato

Gt: γ -Tocoferol

Ar: Aristolona

Esc: 2,6,10,14,18,22 tetracosahexano-2,6,15,19,20,23 hexametil (Escualeno)

St-ol: Estigmaest-5-en-ol (3- β) (Estigmasterol)

St-st: Estigmaest-5,22-dien-3-ol (3 beta, 22E)

St-one: Estigmaest-4-en-3-ona (Estigmaestenona)

Urs: Urs-12-en-3-ol, (3.beta) (α -Amirin)

HOPANO:

Sec: 17,21*sec*ohopano

Tabla 33. Composición química del extracto lipídico en suelos (0-10 cm), bajo diferentes cultivos, del Estado de Michoacán.

	Aguacate	Brócoli
<i>n</i> -alcanos	C ₂₂ -C ₃₅	C ₂₂ -C ₃₅
<i>n</i> -ácidos grasos	C ₁₄ -C ₂₃	C ₁₄ -C ₂₂
<i>n</i> -metilcetonas	C ₂₃ -C ₃₃	C ₂₃ -C ₃₃
<i>n</i> -aldehídos	C ₂₆ -C ₃₅	C ₂₂ -C ₃₀
*Otros	Ph, Ad, Esc, St-ol	Ph, Esc, Erst, St-one, Urs, Ol, 17B

*

Ph: Dialquil ftalato

Ad: Dioctil adipato

Esc: 2,6,10,14,18,22 tetracosahexano-2,6,15,19,20,23 hexametil (Escualeno)

Erst: Ergoest-5-en-3ol (3β)

St-ol: Estigmaest-5-en-ol (3-β) (Estigmaesterol)

St-one: Estigmaest-4-en-3-ona (Estigmaestenona)

Ol: Olean-12-en-3-ol, (3.beta) (β-Amirin)

Urs: Urs-12-en-3-ol, (3.beta) (α-Amirin)

HOPANO:

17B: 17B(H), 21α(H)-moretano

propiedades hidromórficas, ya que sus bajas concentraciones no permiten establecer una relación de dominio.

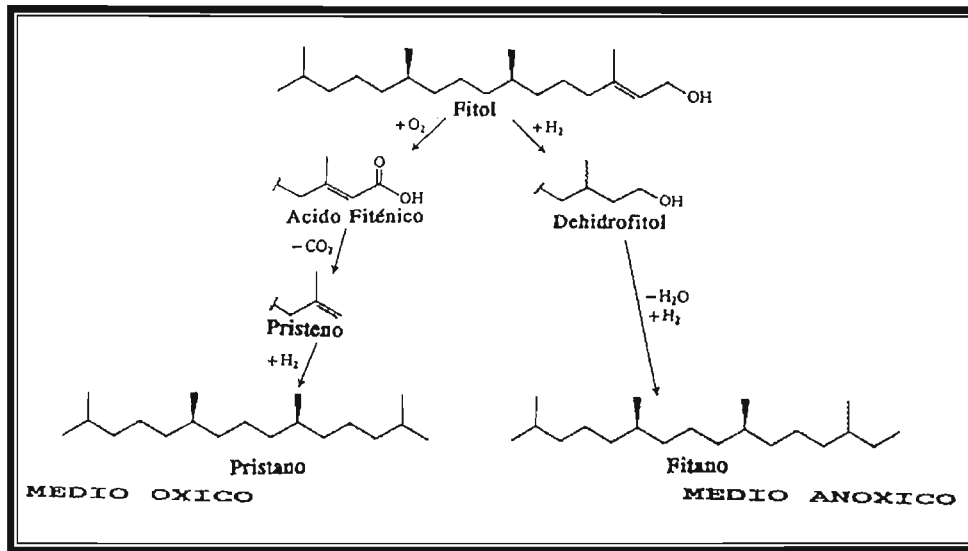


Figura 25. Ruta degradativa del fitol, según el carácter óxico/anóxico del medio deposicional (De: García-Mollá, 1994).

En la Figura 26 se presentan los espectros de masas del pristano y fitano, caracterizados por los fragmentos m/z 113, 127, 183 y 197, así como los espectros de masas de los alcanos lineales n -C19 y n -C20 para su respectiva comparación.

Es importante mencionar, que la biosíntesis del grupo de los triterpenos ocurre en los organismos vivos por ciclación del escualeno, un hidrocarburo isoprenoide no cíclico (C₃₀H₅₀), componente ubicuo en los organismos. Los triterpenos pueden tener tres, cuatro o cinco anillos en su estructura. Los triterpenos tetracíclicos más importantes son los esteroides, y geoquímicamente destacan los compuestos C₂₇ a C₃₀ con un grupo β-hidroxi en la posición C-3. Los triterpenos pentacíclicos se encuentran normalmente en las plantas superiores, concretamente como constituyente de las resinas y pueden distinguirse tres

grandes grupos, oleano, ursano y lupano. Otra importante serie de triterpenos pentacíclicos asociada a bacterias es la que presenta el anillo E de ciclopentano, configurando el esqueleto hopano, entre los que destaca, por ejemplo, el bacteriohopanotetrol (Killops y Killops, 1993).

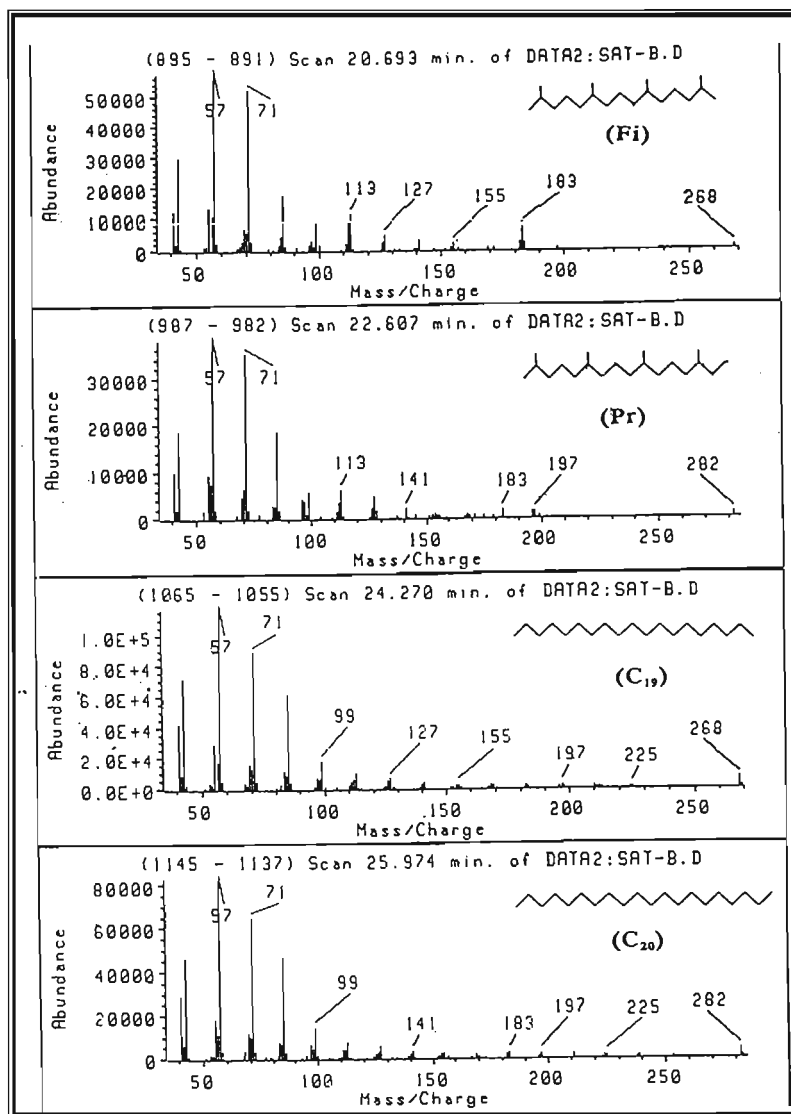


Figura 26. Espectros de masas de 2,6,10,14-tetrametilpentadecano (pristano), 2,6,10,14-tetrametilhexadecano (fitano), nonadecano y eicosano en los lípidos libres de suelos con cultivo de café.

El escualeno (2,6,10,14,18,22-tetracosahexano-2,6,10,15,19,23 hexametil, como precursor de los esteroides, se encontró normalmente en la mayoría de las muestras tanto de origen antropogénico como genético (Figura 27).

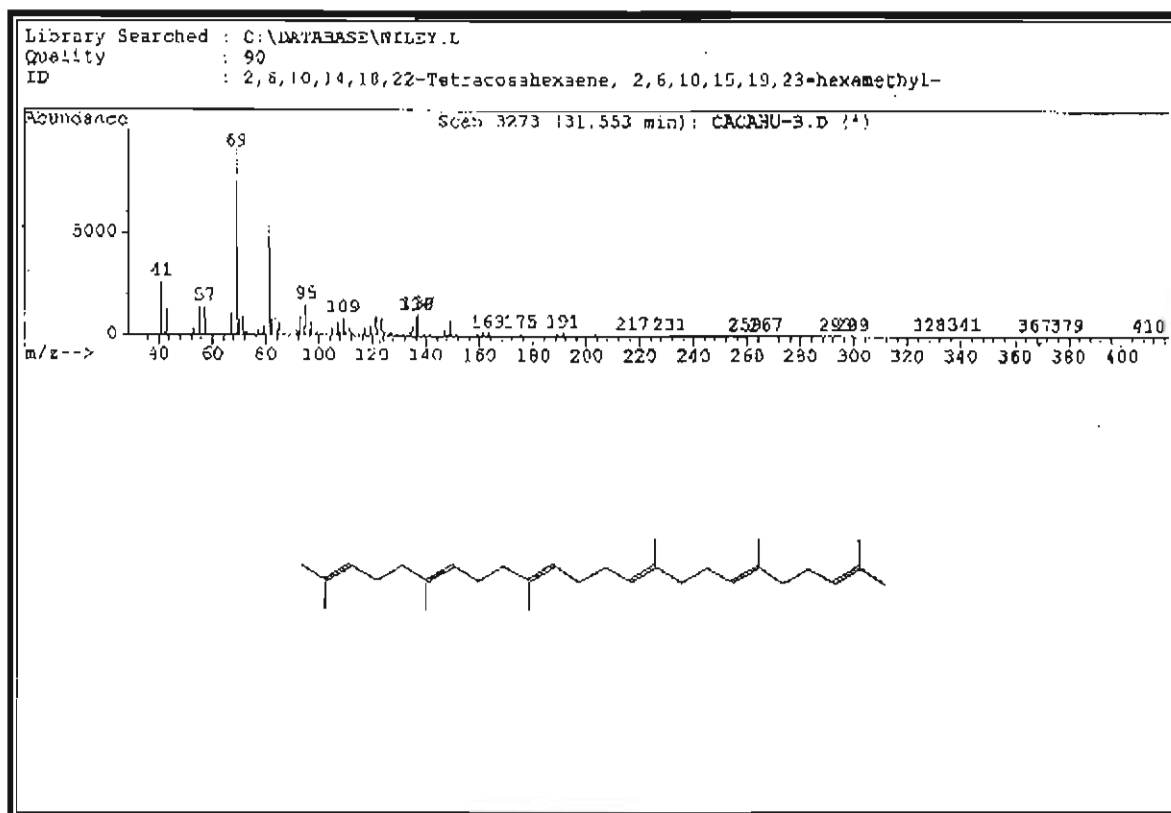


Figura 27. Espectro de masa del escualeno, en extracto de lípidos libres de suelos con cultivo de cacahuete.

Los esteroides son 3- β -hidroxiesteroides cristalinos que contienen una cadena lateral alifática, están ampliamente distribuidos en formas tanto libres como esterificadas con ácidos alifáticos o como glicósidos, ya sea de origen animal, vegetal y fúngico. A pesar que algunos esteroides tienen más de uno de los orígenes mencionados, se observan distribuciones características. Distintas cadenas laterales dan lugar a una serie de esteroides

muy abundantes y característicos de plantas, tales como estigmasterol, sitosterol, brasicasterol, campesterol, entre otros.

Este grupo de esteroides se encontró en la mayoría de las muestras estudiadas, representado por el ergosterol (origen fúngico), colesterol (origen animal) y el estigmaesterol (origen vegetal). Por lo que este grupo puede considerarse como una fuente importante de la materia orgánica en los sitios muestreados. El esteroide que estuvo presente en la mayoría de las muestras fue la estigmastenona (Stigmast-4-en-3-one) seguido por el estigmaesterol (Stigmast-5-en-ol 3 (β), ambos provenientes de plantas superiores, al igual que el ergosterol (Figura 28 y 29).

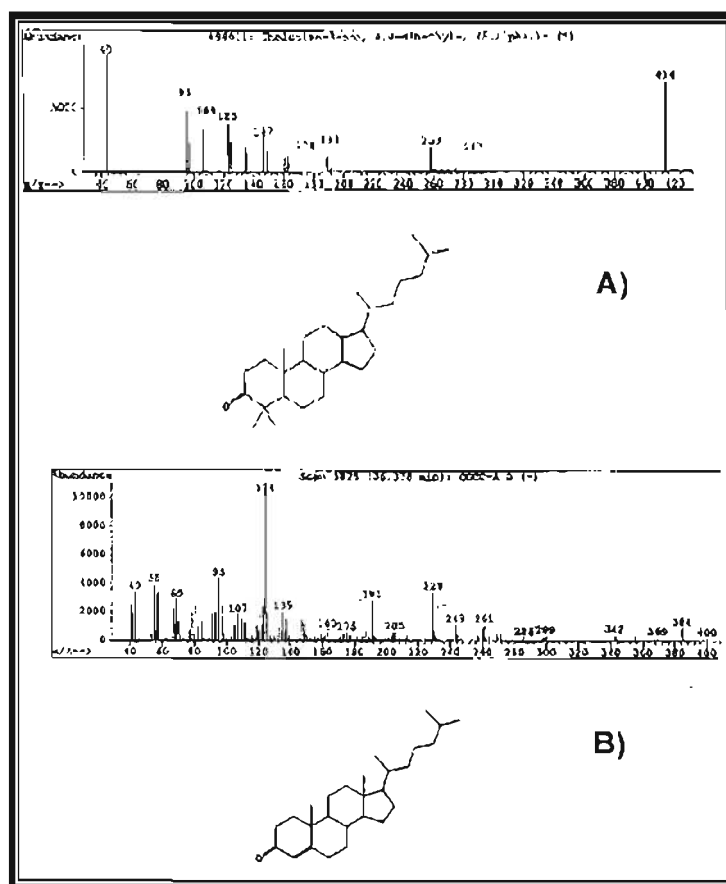


Figura 28. Espectro de masas del A) colest-4-en-3-ona; B) colest-4-en-3-ona.

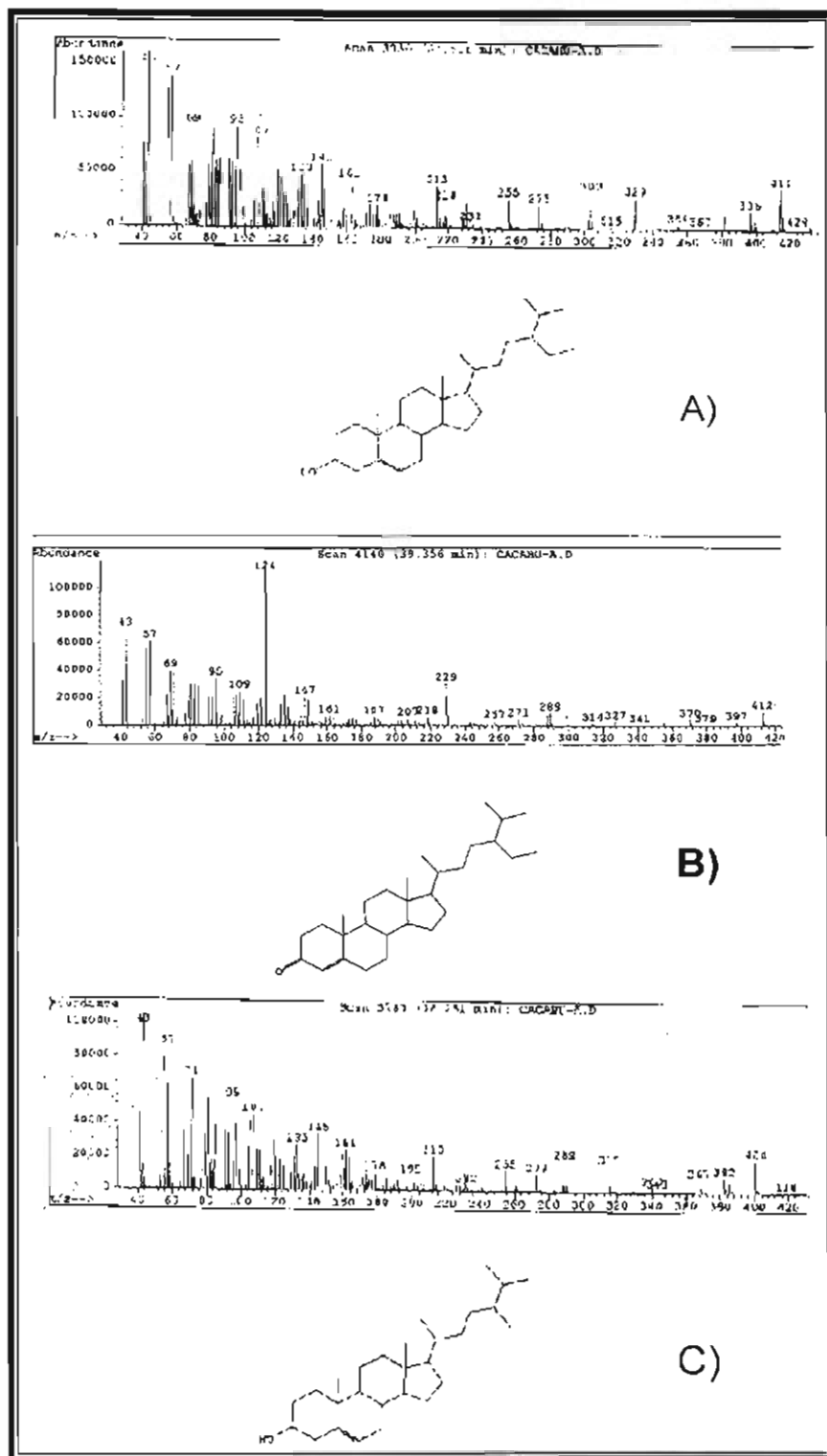


Figura 29. Espectros de masas de A) Estigmast-5-en-3-ol; B) (24R)-4-Estigmasten-3-one; C) Ergost-5-en-3-ol, en el extracto de suelos con cafeto.

Dentro de los esteroides, el colesterol es el más representativo del grupo, ya que son característicos de animales superiores, constituyendo un importante componente de los tejidos y además por ser precursor de hormonas esteroidales y ácidos biliares. Se encuentra así mismo en animales inferiores tanto terrestres como acuáticos, es minoritario en plantas y característico de muchas algas marinas rojas. En este estudio se detectó en muestras aisladas, como por ejemplo en el suelo del municipio de Xochimilco (0-10 cm) cultivado con maíz y en suelos bajo cafeto (Perfil 1) y cocotal (Perfil 4), por lo que no se podría considerar como un rasgo importante, ya que los 3 sitios de estudio no comparten propiedades de origen y condiciones ambientales. Aunque Breger (1973) menciona que particularmente el colesterol es preservado preferentemente en condiciones húmedas, con niveles bajos de oxígeno.

La distribución de los triterpenoides tetracíclicos varía entre las muestras, la detección del olean-12-en-3-ol, (3.beta) (β -amirina), Urs-12-en-3-ol, (3.beta) (α -amirina) y taraxerol indican un claro origen de las plantas superiores (Killops y Killops, 1993) (Figura 27). A pesar de la gran cantidad de carbono orgánico y lípidos totales en los suelos de Tláhuac específicamente en la profundidad de 170 a 180 cm, no pudimos confirmar la presencia de triterpenos tetracíclicos así como de pentacíclicos.

Otro grupo importante en los suelos estudiados son los hopanoides, donde sus principales precursores son los polihidroxihopanos, considerados como metabolitos esenciales en las bacterias, actuando como estabilizadores de las membranas celulares (Simonin *et al.*, 1996).

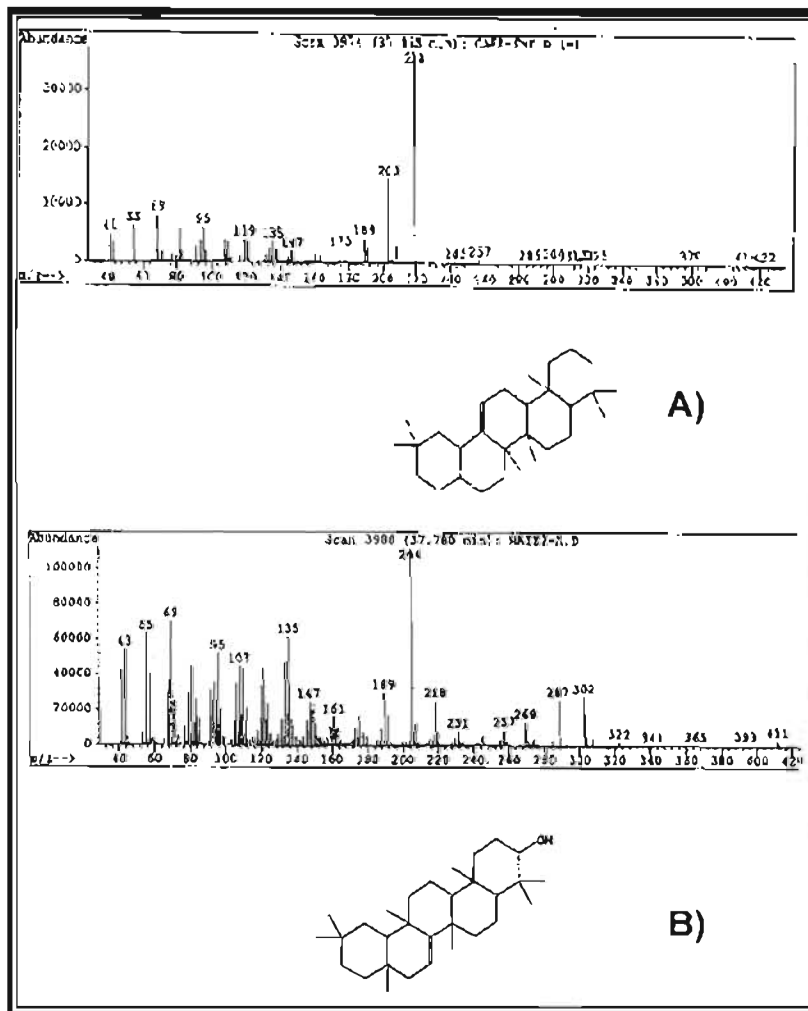


Figura 30. Espectro de masas de A) α o β amirin (en suelos con cultivo de Cafeto); B) Taraxerol (con cultivo de maíz).

Se acepta normalmente que los hopanos derivan del diplopteno, o del C₃₅ bacteriohopanotetro, ambos presentes en microorganismos (Ourisson *et al.*, 1984), los cuales producen a los hopanos en la configuración biológica precursora 17 β (H), 21 β (H), en el rango de C₂₇-C₃₅. En la Figura 31 se muestra la estructura general de los hopanos y las configuraciones más características.

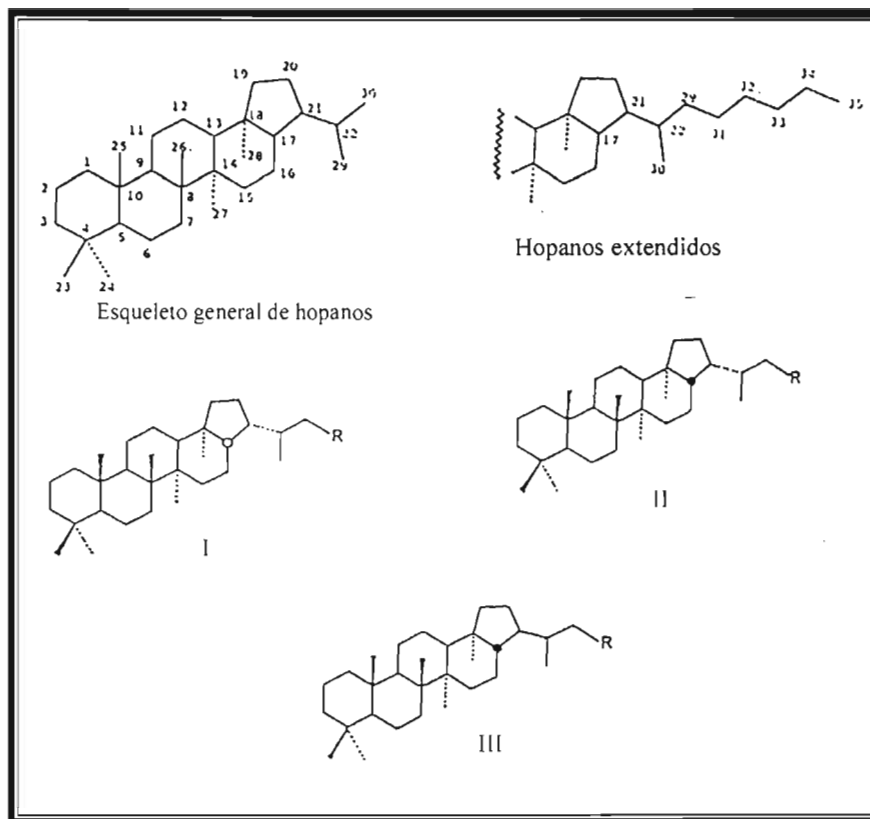


Figura 31. Estructura general de hopanos con sus configuraciones más características I)17 α (H),21 β (H)-hopanos; II)17 β (H),21 β (H)-hopanos ; (III) 17 β (H),21 α (H)-moretanos (En: García-Mollá,1994).

Por lo tanto, la presencia de los hopanos en muestras edafológicas y geológicas está relacionada principalmente con la actividad bacteriana y también con la presencia de algas verde-azuladas.

Las distribuciones de los hidrocarburos pentacíclicos con esqueleto hopanoide identificados en diversas muestras presentan señales en el ion m/z 191. La identificación de los componentes individuales se realizó de acuerdo a los espectros de masas y tiempos de retención relativos publicados, en la bibliografía.

Los precursores bioquímicos de los hopanos tienen la estereoquímica 17 β (H),21 β (H) (III) y con la configuración R en la posición C-22. Durante los procesos de maduración, esta

configuración evoluciona hacia otras termodinámicamente más estables; en una primera etapa se forman los moretanos, con la configuración $17\beta(H),21\alpha(H)$ (II), y finalmente los compuestos de mayor estabilidad termodinámica, los $17\alpha(H),21\beta(H)$ (I) (van Dorsselaer *et al.*, 1977).

En la Figura 32 se puede observar que hay una significativa variación en la abundancia relativa de los iones m/z 191 y m/z 177, así, en la configuración $17\alpha(H),21\beta(H)$ (III), el ion m/z 191 presenta mayor intensidad que el ion m/z 177, mientras en la configuración $17\beta(H),21\beta(H)$ (II) es el fragmento m/z 177 es el que presenta mayor intensidad. En la configuración de $17\beta(H),21\alpha(H)$ (II) (moretanos), la relación de intensidad es similar.

En esta investigación sólo logramos registrar al hopano con configuración $17\beta(H),21\alpha(H)$ (II) (moretano), el cual se presentó en las muestras bajo cacahuete (Perfil 4), brócoli (Perfil 9), y maíz para la profundidad de 100-110 cm (Calicata 1). Este compuesto se caracteriza por presentar una evolución termodinámica más estable que su precursor, aunque debe mencionarse que no alcanza todavía el estado máximo de estabilidad.

También se identificaron una serie de hidrocarburos tetracíclicos, que de acuerdo con sus espectros de masas, los tiempos de retención relativos y las asignaciones hechas previamente por Aquino Neto *et al.*, (1983), corresponden a los 17,21-*sec*ohopanos. En la Figura 33 se presenta la formación de los 17,21-*sec*ohopanos, aspecto importante a considerar, ya que se trata de un triterpeno tetracíclico, no cumpliendo una de las características del grupo de los hopanos; sin embargo, la señal en el ión m/z 191 es un rasgo importante de este grupo. La transformación es posible que ocurra por ruptura del enlace 17(21) del hopano precursor, hop-17(21)-eno, por influencia microbiana durante las primeras etapas de transformación bioquímica (Trendel *et al.*, 1982).

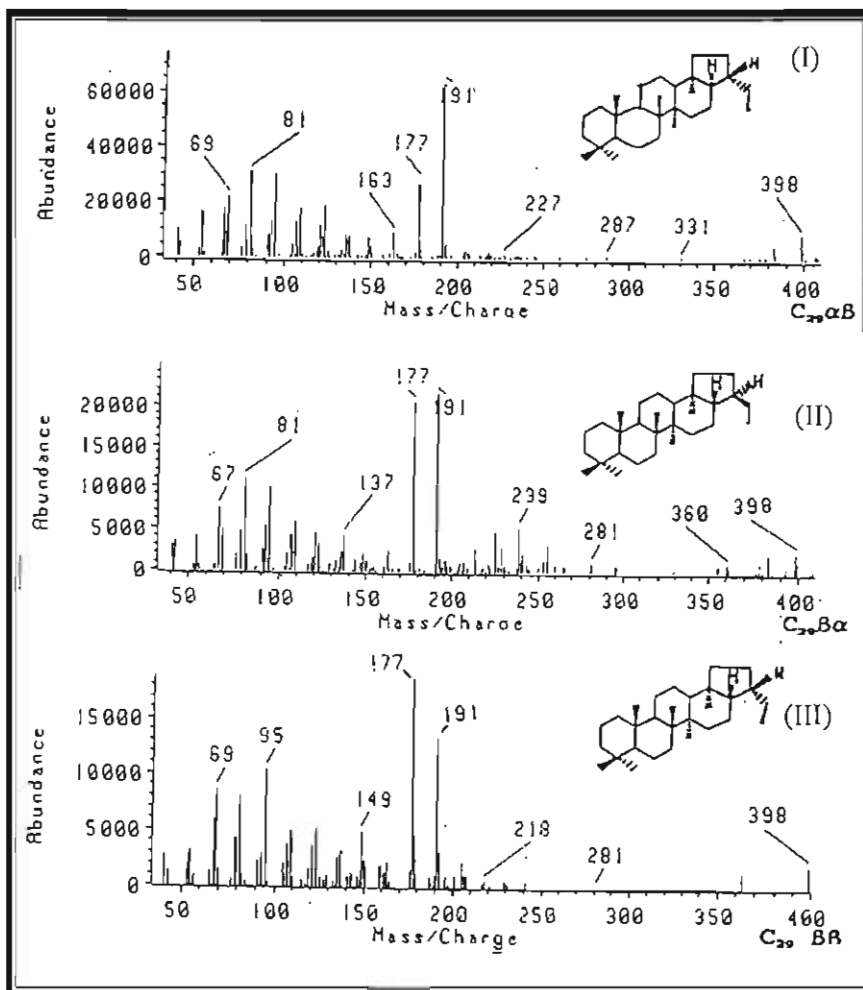


Figura 32. Espectros de masas de los hopanos (C₂₉) a) 17 α (H),21 β (H) (I); 17 β (H),21 α (H)-C₂₉ (II) y 17 β (H),21 β (H)-C₂₉ (III) (*En*: García-Mollá,1994).

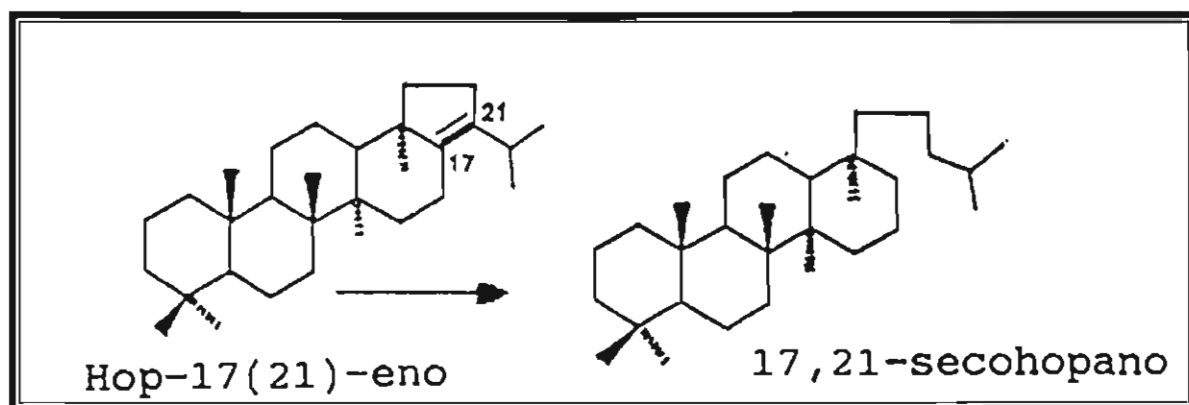


Figura 33. Formación de los 17,21-secohopanos por degradación bacteriana del Hop-(17(21)-eno (Trendel *et al.*, 1982).

Esta serie se detectó en las muestras de suelos cultivados con ajonjolí (Perfil 2), cocotal (Perfil 4) y cacaotal (Perfil 7), se trata de suelos poco desarrollados (Entisoles e Inceptisol), todos con buen drenaje y condiciones de temperatura semejantes. En la Figura 31 se muestra el espectro de masas del 17,21-*secohopano*, se observa el fragmento característico m/z 191 y el ión molecular m/z 330.

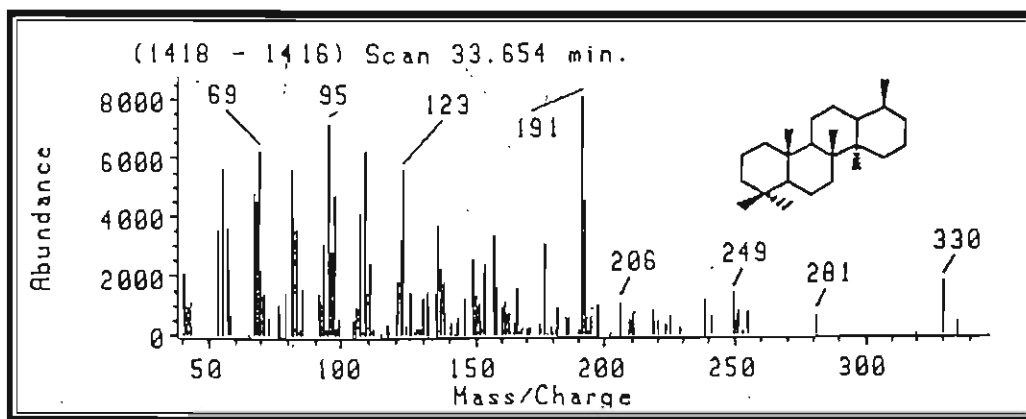


Figura 34. Espectro de masas del 17,21-*secohopano* identificado en los Perfiles 2, 4 y 7.

El 17 α (H),18 α (H),21 β (H)-28,30-bisnorhopano, proviene del 28,30-bisnorhop-17(18)-eno es un constituyente característico y específico de la bacteria *Beggiatoa* (Seifert *et al.*, 1978), presente en los suelos que corresponden a los cultivos de cacahuate (Perfil 3) y maíz con 0-10 cm de profundidad (Calicata 1) y nuevamente en el cultivo de ajonjolí (Perfil 2).

El 30-norneohop-13(18)-ano se registró únicamente en el suelo con cultivo de ajonjolí (Perfil 2) a diferencia del Hop-22(29)-ano que logró detectarse tanto en suelos bajo maíz 100 a 110 cm de profundidad (Calicata 1), brócoli , 0-10 cm (Calicata 2) y Cocotal (Perfil 4).

En los extractos lipídicos de los suelos bajo estudio, la presencia de biomarcadores con esqueleto hopanoide, permite establecer que el bacteriohopanotetrol (precursor bioquímico

de las diferentes series) es un constituyente significativo de la biomasa original de los diferentes suelos. Como se indicó con anterioridad los compuestos triterpénicos con estructura hopanoide son productos fundamentales del metabolismo bacteriano, mientras que las estructuras esteroidales provienen principalmente de organismos eucarióticos (algas y plantas superiores).

En general, el esqueleto carbonoso preservado por estas moléculas pertenece a grandes compuestos estructurales, tales como esteroides, triterpenos cíclicos; estas estructuras pueden proceder directamente de los organismos vivos (sin alteración química) o pueden experimentar algunos cambios durante la diagénesis, que suele asociarse con la pérdida de grupos funcionales y/o estabilización de la molécula por hidrogenación, aromatización o isomerización, como es el caso del grupo de los hopanos. A pesar de la escasa concentración de biomacromoléculas lipídicas en el suelo están menos afectados por la biodegradación, que otros compuestos mayoritarios como los polisacáridos y proteínas (Lichtfouse *et al.*, 1995).

A partir de lo anterior fue posible detectarlos en suelos bajo diferentes condiciones ambientales y usos del suelo, las señales de los compuestos lipídicos en las muestras indican pocas variaciones en la composición molecular en relación a los sitios de muestreo por lo que se sugiere que los suelos tienen un comportamiento biogeoquímico similar. Se puede mencionar que los extractos lipídicos de los suelos investigados son dominados por biomarcadores de plantas y animales superiores, así como todas las formas de actividad microbiana (por ejemplo hongos y bacterias).

3. Extracción de Lípidos con Fluidos Supercríticos.

Con independencia de la información generada por el análisis de los lípidos obtenidos por el sistema tradicional con extractores Soxhlet se consideró conveniente utilizar extracciones con fluidos supercríticos (EFS), como una metodología alternativa en el estudio de suelos y establecer comparativamente las ventajas de ambos métodos.

La extracción con fluidos supercríticos se encuentra ampliamente extendida en la industria con resultados muy favorables, y por el contrario en las Ciencias Ambientales se desarrolló a partir de los años 80; en los últimos años se realizan pruebas a escala analítica con diferentes analitos, gases y condiciones de trabajo (Berg *et al.*, 1999; Reutergardh, *et al.*, 1998; Spack *et al.*, 1998; Zaragoza *et al.*, 1998).

En la Tabla 34 se presenta el rendimiento en peso de los extractos lipídicos libres, obtenidos a partir de los dos métodos de extracción: con el sistema Soxhlet (con una eficiencia de extracción del 90%) y con Fluidos Supercríticos utilizando al CO₂ en estado supercrítico, así como la adición de un modificador (metanol al 10%). Las muestras se seleccionaron en función a las máximas concentraciones que se obtienen del extracto total de lípidos y corresponden al suelo antropogénico, Calicata 1 (Xochimilco de 100 a 110 cm de profundidad) y al suelo de origen genético, Perfil 1, cultivado con cafeto (de 0 a 10 cm de profundidad).

Como se muestra en la Tabla 34, los resultados indican que las extracciones con los FS se encuentran muy próximas a los valores obtenidos con el sistema Soxhlet. Estos resultados demuestran que la EFS puede proporcionar un método rápido y cuantitativo para la extracción de los lípidos en muestras de suelos. La respuesta del modificador (metanol al 10%) se

Tabla 34. Rendimiento (g Kg^{-1}) del extracto lipídico libre, a partir del sistema soxhlet y extracción con fluidos supercríticos (EFS).

Muestras	Sistema Soxhlet	EFS	EFS + Modificador
Calicata 1 (100-110 cm) (Maíz)	3.01 + 0.07	3.34 + 0.16	3.42 + 0.25
Perfil 1 (0-10 cm) (Cafetal)	2.15 + 0.09*	2.33 + 0.11	2.19 + 0.19

* La desviación estándar fue determinada de dos repeticiones por muestra

observa mejor en la muestra de la Calicata 1, ya que el rendimiento aumentó de 3.01 g kg^{-1} (Sistema Soxhlet) a 3.42 g kg^{-1} (EFS + modificador).

En general la principal ventaja que pudo observarse fue ahorro en el tiempo de extracción, ya que normalmente con el sistema Soxhlet las muestras permanecen en reflujo durante 24 horas/muestra y, en contraste, la extracción de FS requirió únicamente de 30 minutos para finalizar el proceso.

El tamaño de muestra representa un factor importante en la eficiencia del método ya que, por ejemplo, en el sistema Soxhlet se utilizan entre 50 y 100 g de suelo y, mientras que para los FS se requieren tamaños de muestra entre 2.34 a 2.55 g de suelo, la variación está determinada por la densidad aparente de cada muestra, ya que la celda de extracción cuenta con un volumen interno de 3.47 cm^3 .

Las condiciones de trabajo para la extracción con FS corresponden a presiones de 20 y 14.8 MP; en el primer caso, cuando se utiliza al CO_2 como disolvente en estado supercrítico y en segundo lugar al CO_2 más un modificador (metanol al 10%), para ambos casos se requieren de 30 minutos para completar la extracción. El modificador se aplicó directamente a la muestra, calculando el volumen en función al peso de la muestra.

En las Figuras 35 y 36 se presentan los cromatogramas correspondientes al total de iones (CIT) de los extractos lipídicos libres de la Calicata 1 (con origen antropogénico) y Perfil 1 (origen genético). En ambas figuras se comparan los métodos de extracción, el convencional (sistema Soxhlet) y la extracción con FS. Los CIT, se obtuvieron a partir de la CG-EM, como método de separación e identificación de los compuestos, bajo los mismos parámetros de trabajo aplicados en las muestras correspondientes al Capítulo 2.

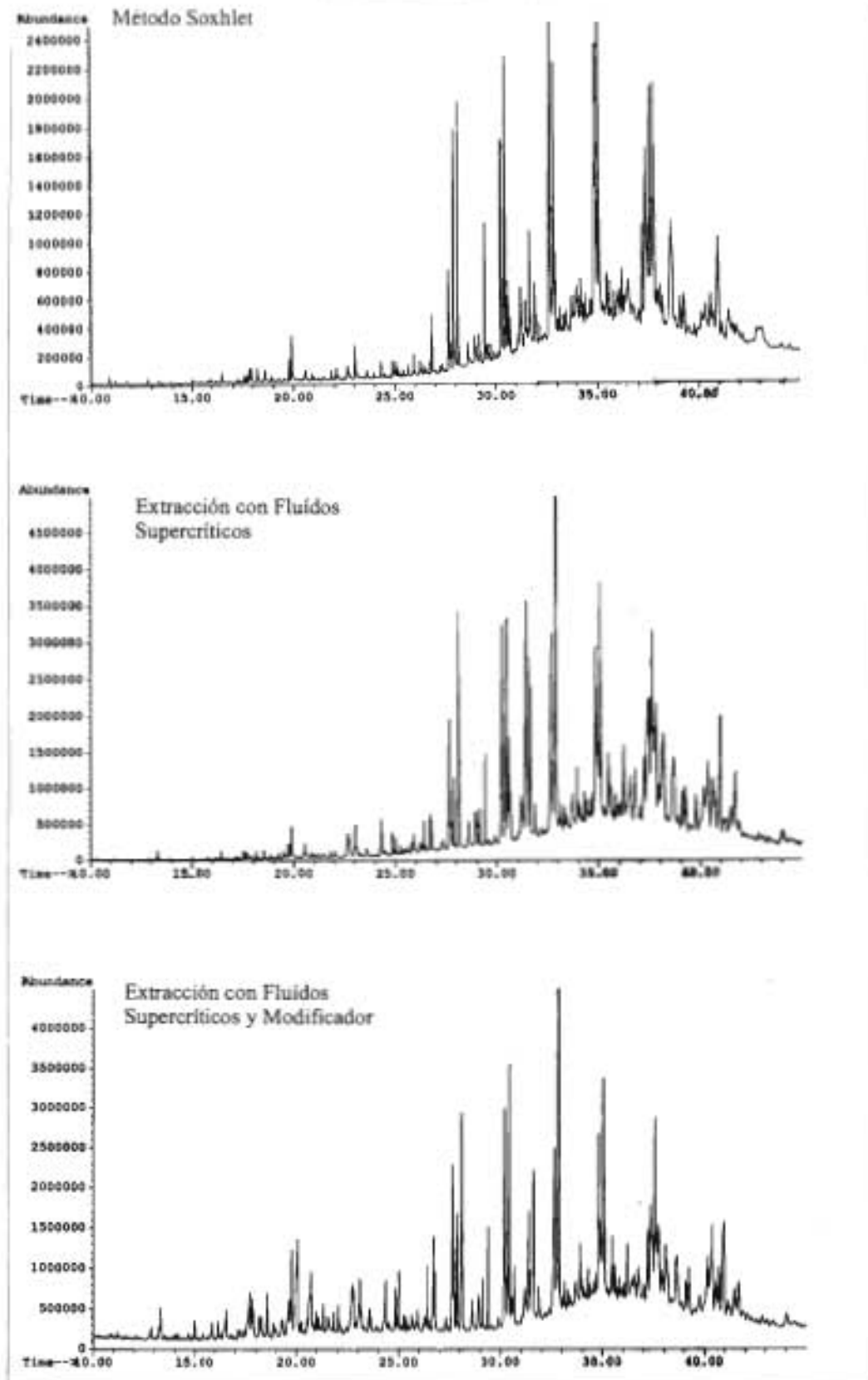


Figura 35. Cromatogramas Iónicos Totales de los extractos lipídicos en suelos antropogénicos, cultivado con maíz (100-110 cm), a partir de diferentes métodos de extracción.

De manera general, si observamos los cromatogramas encontramos que existe semejanza entre los picos más altos, principalmente entre los 28 a 41 minutos; por otro lado en los primeros minutos del CIT existen las mismas señales, variando únicamente en intensidad, siendo más evidentes en los extractos con FS y aumentando aun más cuando se aplicó el modificador (metanol 10%) (Figura 35).

En el Perfil 1 (cultivado con café) el patrón de compuestos extraídos es semejante para los extractos obtenidos con FS y FS con modificador. Comparando los métodos Soxhlet con los FS (con y sin modificador), observamos que en los extractos con FS existe mayor intensidad de los picos, además de algunas señales fuera del rango de 25 a 35 minutos, la primera sección corresponde principalmente a ácidos grasos con número relativamente bajo de carbonos, detectándolos a partir del C₁₂ (Figura 36).

Con ambos métodos las series homólogas de *n*-alcanos, *n*-ácidos grasos, *n*-metilcetonas y *n*-aldehídos, presentaron rangos muy semejantes en relación al número de carbonos. Con los FS se obtuvieron algunos compuestos que no lograron recuperarse en el sistema Soxhlet, éste es el caso del suelo bajo café (Perfil 1), ya que se identificaron *n*-ácidos grasos de menor peso molecular, el C₁₂ y C₁₄, que se registran en los primeros minutos del CIT (Tabla 36). Por otro lado, se pudo identificar los siguientes ácidos grasos metilados: C_{16:1}-CH₃; C_{18:1}-CH₃, C_{20:1}-CH₃, los cuales pueden originarse principalmente de las actividades microbianas (Schutter y Dick, 2000).

Aunque la estabilidad de los alcoholes lineales disminuye cuando se incrementa la longitud de la cadena por encima de 6, el CO₂ en estado supercrítico, permite la miscibilidad de los grupos alcohólicos. El grupo de los alcoholes normalmente puede registrarse en la fracción neutra de los compuestos lipídicos, sin embargo con la extracción de FS, se favorece la recuperación de

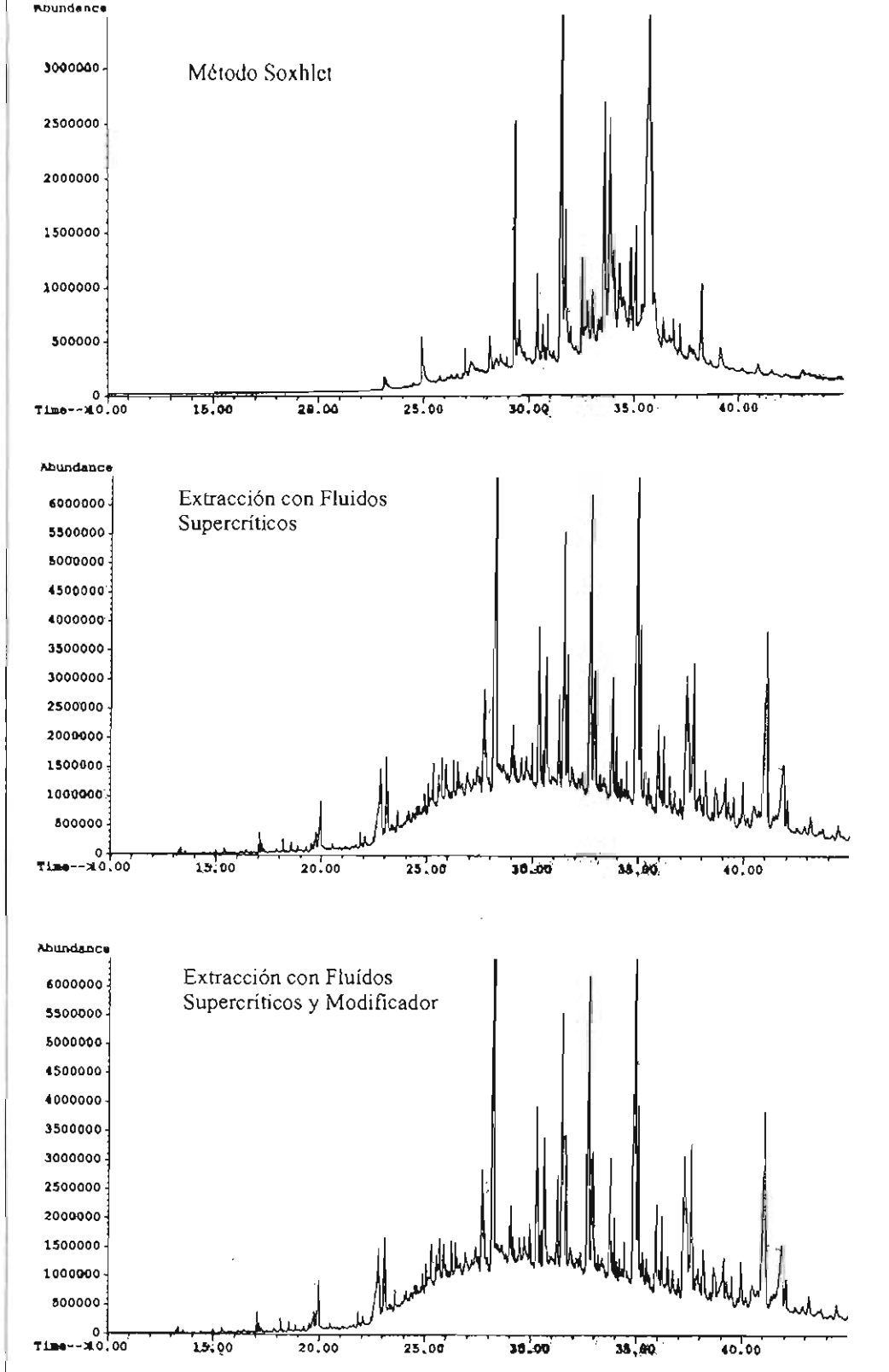


Figura 36. Cromatograma Iónicos Totales de los extractos lípidicos libres en suelos de origen genético, cultivado con café Perfil 1 (0-10 cm), a partir de diferentes métodos de extracción.

Tabla 35. Comparación de los métodos de extracción lipídica en suelos cultivados con maíz (Calicata 1 100-110 cm), a partir de su composición química.

	Método Soxhlet	Extracción con Fluidos Supercríticos	Extracción con Fluidos Supercríticos y Modificador (Metanol 10%)
<i>n</i> -Alcanos	C ₂₅ -C ₃₃	C ₂₅ -C ₃₁	C ₂₁ -C ₃₁
<i>n</i> -ácidos grasos	C ₁₄ -C ₂₂	C ₁₄ -C ₂₂	C ₁₄ -C ₂₀
<i>n</i> -metilcetonas	C ₂₃ -C ₃₃	C ₂₃ -C ₃₅	C ₂₃ -C ₃₃
<i>n</i> -aldehídos	C ₂₂ -C ₃₀	C ₂₃ -C ₃₅	C ₂₂ -C ₃₀
<i>n</i> -alcoholes	tr	C ₂₂ -C ₂₈	C ₂₂ -C ₂₈
Otros*	Ph, Gt, Ta, Va, Tri, St-one, Er-one, Ol Hop, 17β	Ph, Dec, Gt, Va, Erg St-one, St-ol, St-st, 5α Ol, Hop, 17α, 17β, Sec,	Ph, Dec, Gt, Esc, St-one, 5α, St-dien, Ol, Hop, 17α, 17β, Sec, C ₂₇ α, C ₂₇ β

Ph: Dialquil ftalato

Dec: ácido decanedioico, bis (hexil etil) ester

Gt: γ-Tocoferol

Va: Vanillina

Ta: Taraxerol

Tri: Tricosane-2,4-diona

Esc: 2,6,10,14,18,,22 tetracosahexano-2,6,15,19,20,23 hexametil (Escualeno)

Er-one: (24S)-5-α,ergoestan-3-ona

Erg: (24R)-4-Ergoesten-3-ona

St-one: Estigmaest-4-en-3-ona (Etigmaestenona)

St-ol: Estigmaest-5-en-ol (3-β) (Estigmaesterol)

St-st: Estigmaest-5,22-dien-3-ol (3 beta, 22E)

5α. 5α-estigmaest-3-ona

St-dien. Estigmaesta-3,5-dien-7-ona

Ol: Olean-12-en-3-ol, (3.beta) (β-Amirin)

HOPANOS:

17β: 17β(H),21 α(H)

Sec: 17,21-sec-hopano

Hop: Hop-22(29)ano

C₂₇α: 17α(H)-22,29,30 trisnorhopano

C₂₇β. 17β(H)-22,29,30 trisnorhopano

17 α: 17α(H),18α(H)21β(H)-28-30 Bisnorhopano

este grupo en los suelos bajo maíz, sin ningún fraccionamiento previo a su extracción. El intervalo correspondió a C₂₂-C₂₈, presentando los mismos valores con y sin modificador (metanol al 10%) (Tabla 35).

Debe señalarse que el efecto modificador se define como el aumento que experimenta la solubilidad de un soluto cuando se añade una cantidad relativamente pequeña de un segundo disolvente. La adición del modificador puede influir tanto la solubilidad como la interacción de los analitos con la matriz del suelo, mediante la disminución de los sitios activos.

Normalmente el metanol (solvente orgánico polar) puede competir con ciertos compuestos por los sitios de adsorción del suelo y liberarlos de la matriz del mismo. Cuando se aporta el metanol como modificador a los fluidos no polares como el CO₂, se incrementa la extracción de compuestos polares (alcoholes y ácidos grasos). Con lo anterior es posible conseguir compuestos con una amplia gama de polaridades (Reutergardh *et al.*, 1998).

En los extractos de la Calicata 1, los compuestos que permanecieron constantes en los tres casos, fueron el γ -tocoferol, la estigmast-4-en-3-ona, y el olean-12-en-3-ol y (3 β .) (β -amirina). Al mismo tiempo en la Tabla 35, observamos que se favoreció la extracción de los hopanos, ya que por ejemplo con el método Soxhlet se identificaron únicamente dos hopanos: el hop-22(29)ano, y el 17 α (H), 18 α (H), 21 β (H)-28-30-bisnorhopano, los cuales coincidieron en las tres condiciones de trabajo.

En el extracto de FS con modificador logró identificarse el 17 β (H), 21 α (H) y 17,21-*sec*ohopano (ver Figuras 31 y 33), además de dos hopanos no identificados en los anteriores extractos correspondiendo al 17 α (H)-22,29,30 trisnorhopano (C₂₇ α) y el 17 β (H)-22,29,30 trisnorhopano (C₂₇ β) (Figura 42, Apéndice II). El C₂₇ α presentan un pico base a *m/z* 191 y

Tabla 36. Comparación de los métodos de extracción lipídica en suelos bajo café (Perfil 1, 0-10 cm), a partir de su composición química.

	Método Soxhlet	Extracción con Fluidos Supercríticos	Extracción con Fluidos Supercríticos y Modificador (Metanol 10%)
<i>n</i> -alcanos	C ₁₇ -C ₃₅	C ₂₃ -C ₃₃	C ₁₉ -C ₃₃
<i>n</i> -ácidos grasos	C ₁₄ -C ₃₄	C ₁₂ -C ₃₂ 16:1-CH ₃ , 18:1-CH ₃ ; 20:1-CH ₃	C ₁₂ -C ₃₂ 16:1-CH ₃ , 18:1-CH ₃ ; 20:1-CH ₃
<i>n</i> -metilcetonas	C ₂₅ -C ₃₅	C ₂₄ -C ₃₅	C ₂₄ -C ₃₅
<i>n</i> -aldehídos	C ₂₈ -C ₃₄	C ₂₆ -C ₃₄	C ₂₆ -C ₃₂
*Otros	Ph, Ch, Esc, St-one, Ol, Urs, No, Pri, Fi	Ph, Dec, Esc, Ar, Urs, St-one, Sec, 17β	Ph, Dec, Esc, Ar, Urs, St-one, Sec, 17β

Ph: Dialquil ftalato

Ch: Colest-4-en-3-ona

Dec ácido decanedioico, bis (etil hexil) ester

Ar: Aristolona

Esc: 2,6,10,14,18,,22 tetracosahexano-2,6,15,19,20,23 hexametil (Escualeno)

St-one: Estigmaest-4-en-3-ona (estigmaestenona)

Ol: Olean-12-en-3-ol, (3.beta) (β-Amirin)

Urs: Urs-12-en-3-ol, (3.beta) (α-Amirin)

No: Noruns-12-en

Pri: Pristano

Fi: Fitano

HOPANOS:

Sec: 17,21-secohopano

17β: 17β(H),21 α(H)-moretano

fragmentos característicos a m/z 95, mientras que el $C_{27}\beta$ presenta un pico base a m/z 149 (citados previamente en García-Mollá, 1994).

En relación al Perfil 1, los FS facilitaron la extracción del $17\beta(H),21\alpha(H)$ y el $17,21$ -*secohopano*, que con el método convencional no lograron extraerse.

La extracción con FS reduce el tiempo necesario de extracción, el peso de muestra requerido, así como la generación de residuos tóxicos al ambiente y presenta la ventaja de simplificar el método de recuperación de los lípidos extraídos.

En futuras investigaciones sería conveniente realizar extracciones de clases selectivas, las cuales consisten en modificar la fuerza de los solventes de un FS, a partir de cambios en la presión y temperatura, lo que permitiría obtener una extracción selectiva con un mismo fluido.

4. Los lípidos y su relación con la fracción órgano-mineral

La fracción órgano-mineral del suelo interacciona continuamente con diferentes iones en solución, así como con biomacromoléculas de diverso peso molecular (Deng y Dixon, 2002). En este capítulo se discutirá particularmente la relación existente entre los lípidos del suelo, la fracción mineral (arena-limo-arcilla) y los ácidos húmicos en base a la distribución del carbono orgánico.

La captura del carbono orgánico en los ecosistemas terrestres está determinada por la dinámica de dos almacenes importantes: la vegetación y el suelo. En este último, la MOS es considerada como la principal reserva de carbono estable del planeta, la cual se encuentra en forma de restos vegetales, animales y microbianos. Normalmente estos residuos son rápidamente biodegradados y asociados a la fracción mineral, mediante enlaces lábiles, mientras que la otra parte de la MOS está constituida por sustancias húmicas, constituidas por formas de carbono altamente estables (Schnitzer y Khan, 1972).

Para establecer las posibles relaciones entre los lípidos y la fracción órgano-mineral se seleccionaron las muestras de suelo superficial (0-10 cm), que incluyeron a los de origen antropogénico (calicatas) y genético (perfiles). Para la obtención de los extractos de lípidos ligados se consideró a la fracción órgano-mineral en su conjunto, incluyendo a las partículas minerales (arena, limo y arcilla) y fracción húmica.

En la Tabla 37 se presenta el contenido de carbono orgánico total (COT) de los sitios de muestreo, los niveles de carbono orgánico en las fracciones arena, limo y arcilla, así como la proporción de ácidos húmicos (AH) que se extrajeron en medio alcalino.

Tabla 37. Contenido del carbono orgánico total, proporción de carbono orgánico en la fracción mineral y proporción de ácidos húmicos (AH) en muestras de suelos (0-10 cm).

Sitios de muestreo	Carbono	Arena	Limo	Arcilla	Proporción en peso AH g kg ⁻¹
	Orgánico Total	Proporción de Carbono Orgánico g kg ⁻¹			
Calicata 1 (maíz)	73	9.2	32.1	31.6	78
Calicata 2 (brócoli)	65	10.3	30.2	24.1	94
Perfil 1 (cafeto)	76	12.2	20.7	43.1	46
Perfil 2 (ajonjolí)	4	0.8	0.6	2.6	0.9
Perfil 3 (cacaohuate)	4	2.1	0.5	1.4	2.1
Perfil 4 (cocotal)	18	1.2	4.3	12.5	13
Perfil 5 (cacaotal)	36	9.7	14.2	12.1	34
Perfil 6 (pastizal)	27	2.9	10.4	13.7	22
Perfil 7 (cacaotal)	26	3.6	12.9	9.5	31
Perfil 8 (aguacate)	36	2.9	22	11	29
Perfil 9 (brócoli)	32	6.3	10.3	15.3	24

De manera general, podemos observar que existe una amplia gama en el contenido de COT, ya que los suelos partieron de diversos factores formadores (ver Capítulo 1) y por tanto con diferentes relaciones de mineralización/humificación.

Las muestras que sobresalieron en AH fueron los suelos antropogénicos con 78 y 94 g kg⁻¹ en peso (Calicata 1 y 2 respectivamente). En las Tablas 9 y 10 se muestra que los contenidos de lípidos ligados (1.22 y 0.72 g kg⁻¹) para muestras superficiales, superaron a los lípidos libres (1.05 y 0.51 g kg⁻¹) respectivamente.

Es importante mencionar que los suelos de origen genético con mayor contenido de AH correspondieron a los Perfiles 1 (cultivado con cafeto) con 46 g kg⁻¹, Perfil 5 (cacaotal del Municipio de Cunduacán) con 34 g kg⁻¹ y Perfil 7 (cacaotal del municipio de Puyacatengo) con 31 g kg⁻¹. Se trata de sitios donde la cubierta vegetal permanece durante todo el año, promoviendo la adición continua de los residuos vegetales, por lo que puede señalarse que la vegetación adquiere un papel importante en el proceso de humificación.

Por otro lado, sólo en los dos primeros casos se observaron valores superiores en los lípidos ligados (2.43 y 0.21 g kg⁻¹), frente a los lípidos libres (2.15 y 0.19 g kg⁻¹) respectivamente. Aunque, en el Perfil 7 el contenido de AH es considerable el proceso de humificación, no ha sido importante en la preservación de los lípidos, si consideramos los casos anteriores.

Al mismo tiempo, podemos mencionar que tal vez podrían existir procesos semejantes en la preservación de los lípidos a través de los AH, ya que existe un comportamiento similar para algunas profundidades mayores de 10 cm para las Calicatas 1 y 2 (Tablas 9 y 10), así como en los suelos cultivados con cafeto (Tabla 11) y en los sitios muestreados bajo cacaotal (Tablas 22 y 24).

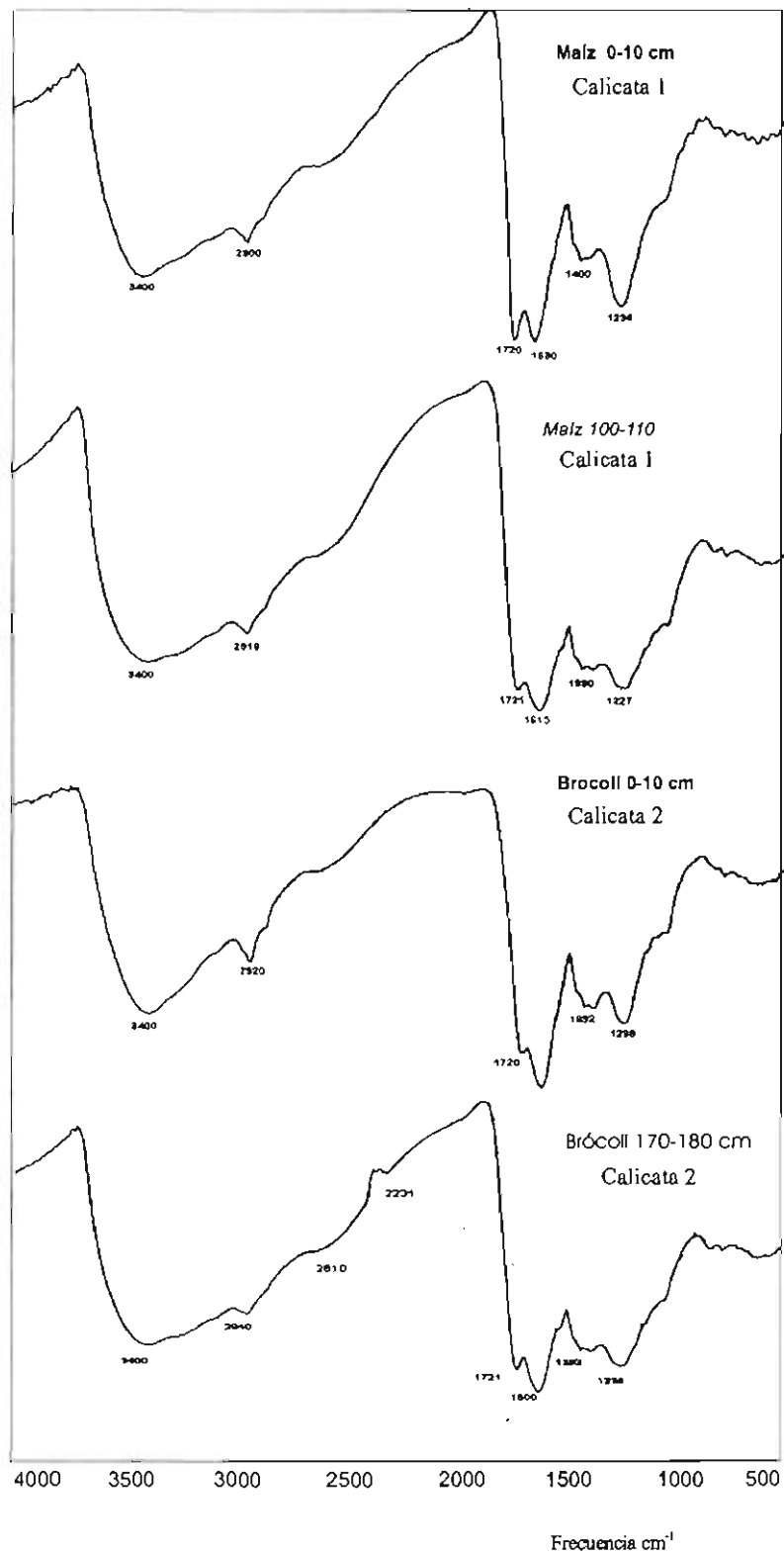


Figura 37. Espectros de infrarrojos de los AH en muestras de suelos, de los Municipios de Xochimilco y Tláhuac, bajo diferente cubierta vegetal.

La MOS con mayor humificación generalmente se caracteriza por su elevada estabilidad en los complejos órgano-minerales; los AH llegan a ser más hidrófobos con los procesos de humificación (Stevenson, 1982). Aquí debe señalarse que esta última propiedad se percibió al tacto con los AH, especialmente para las muestras antropogénicas. Por otro lado, los AH pueden retener más del 2% de compuestos orgánicos hidrofóbicos (Jambu *et al.*, 1995).

Normalmente, los alcanos pueden incorporarse a las sustancias húmicas a través de oclusión física e interacciones hidrofóbicas (Almendros *et al.*, 1996). La pirólisis de sustancias húmicas indicó la presencia de isoprenoides, esteroides, hopanos y abundante proporción de alcanos (Lichtfouse, 1988a). Para todas las muestras, tanto en los extractos de lípidos libres como ligados, fue posible aislar e identificar a los alcanos, a pesar de no contener grupos funcionales.

Los espectros de infrarrojo (IR) de los ácidos húmicos no presentan grandes diferencias entre las zonas de muestreo, indicando las bandas de absorción típicas de estas sustancias y reflejando pequeñas diferencias analíticas (ver Figuras 37, 38, 39 y 40). Las bandas de absorción más evidentes estuvieron cercanas a 3400 cm^{-1} (grupos funcionales que contienen oxígeno), 2920 cm^{-1} (vibraciones de grupos alquilo CH_2 - alifáticos), 1720 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ en COOH y éteres), 1600 cm^{-1} (vibraciones $\text{C}=\text{C}$ en anillos aromáticos), 1400 cm^{-1} (bandas complejas CH_3 , COO^- , OH) y 1200 cm^{-1} (grupos carboxilos $\text{C}-\text{O}$, OH).

Las funciones oxigenadas (3400 y 1720 cm^{-1}) presentaron bandas de intensidad considerable indicando la presencia de los sitios activos en relación al intercambio de cationes o, en su caso, de lípidos polares (Fortún *et al.*, 1986). El anterior comportamiento pudo observarse en las Calicatas 1 y 2 (Figura 37) coincidiendo con contenidos importantes en lípidos ligados. Asimismo en los Perfiles 1, 5 y 7 (Figuras 38 y 39 respectivamente) se observaron patrones

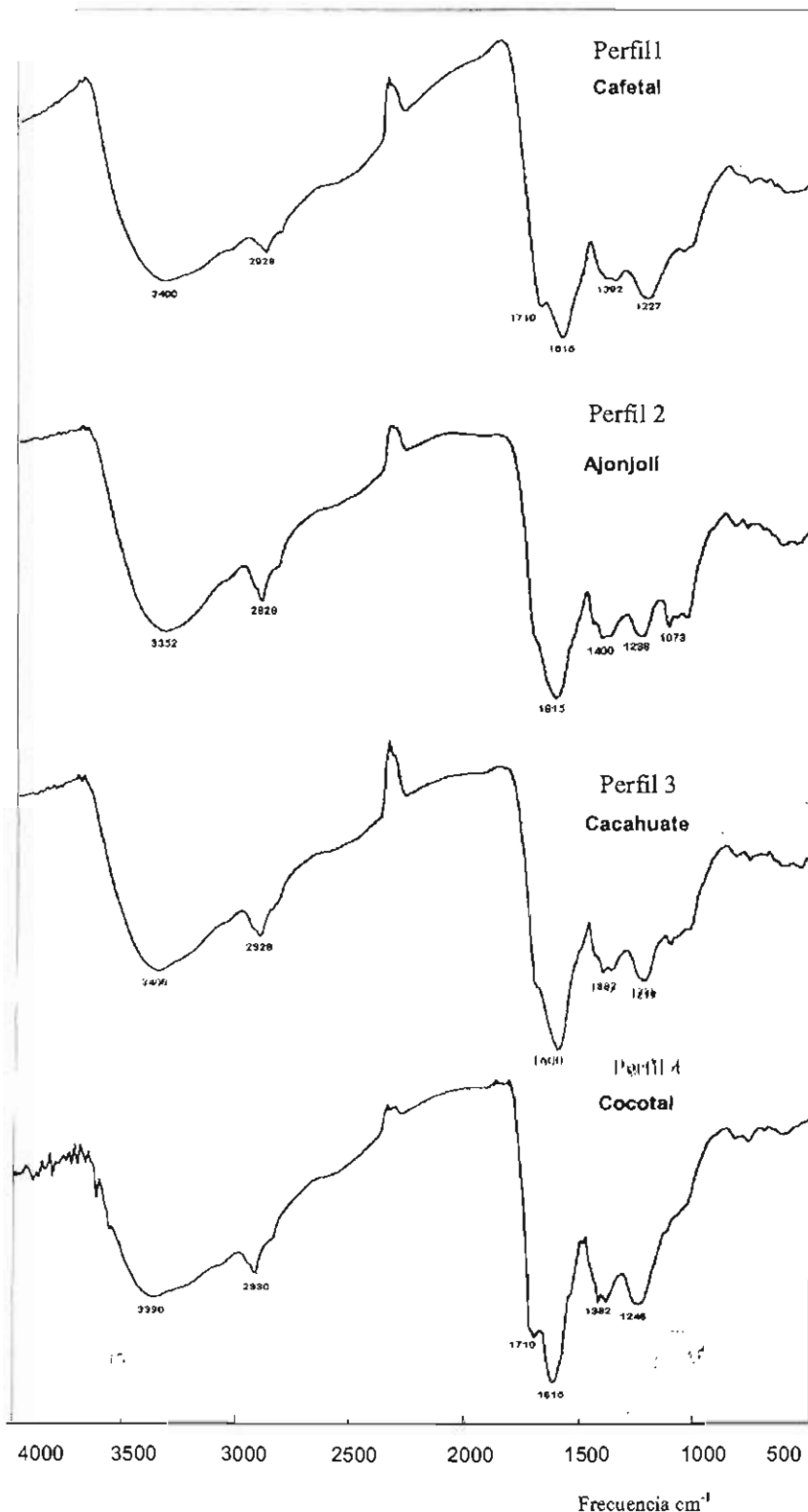


Figura 38. Espectros de infrarrojos de los AH en muestras de suelos (0-10 cm), del Estado de Guerrero, bajo diferente cubierta vegetal.

similares. En cambio para las muestras de suelos correspondientes a los cultivos de ajonjolí y cacahuate (Figura 38) se observa una diferencia importante entre los espectros, ya que no se registró la banda de 1720 cm^{-1} correspondiente a enlaces C=O en COOH y éteres, coincidiendo con el dominio de los lípidos libres.

En todos los espectros se observa mayor intensidad en la región de 1600 cm^{-1} que corresponde a los compuestos aromáticos (Kang *et al.*, 2003), en relación al grupo de los alifáticos con señales a 2920 cm^{-1} .

En los suelos cultivados con ajonjolí y pastizal aparecen señales en las frecuencias de 1054 y 1073 cm^{-1} , que indican tensiones C-O y C-H, correspondientes a polisacáridos o sustancias relacionadas en el rango de $1080\text{-}1050\text{ cm}^{-1}$, citado en Orlov (1985). En la muestra $170\text{-}180\text{ cm}$ de profundidad cultivada con brócoli, se registra la señal en la frecuencia de 2610 cm^{-1} , muy cercana a la de 2600 cm^{-1} , relacionada con la presencia de grupos funcionales que contienen oxígeno.

Después de la recuperación de los lípidos libres y ligados, las muestras se sometieron a extracción exhaustiva de AH; la espectroscopia de IR registró señales entre 2950 a 2840 cm^{-1} , de nuevo relacionadas con las vibraciones C-H de grupos metileno y metilo, señales reportadas previamente en González-Vila *et al.*, 1984. Los registros anteriores y el brillo céreo que presentan los AHs podrían indicar que los compuestos lipídicos están asociados a las sustancias húmicas.

Por otro lado, para establecer la distribución del carbono orgánico (C orgánico) en la fracción mineral del suelo y conocer su posible participación en procesos de adsorción de los extractos lipídicos, se realizó el previo fraccionamiento físico de las partículas: en arena, limo y arcilla, determinando el contenido de C orgánico en cada una de estas fracciones, realizándose sólo en

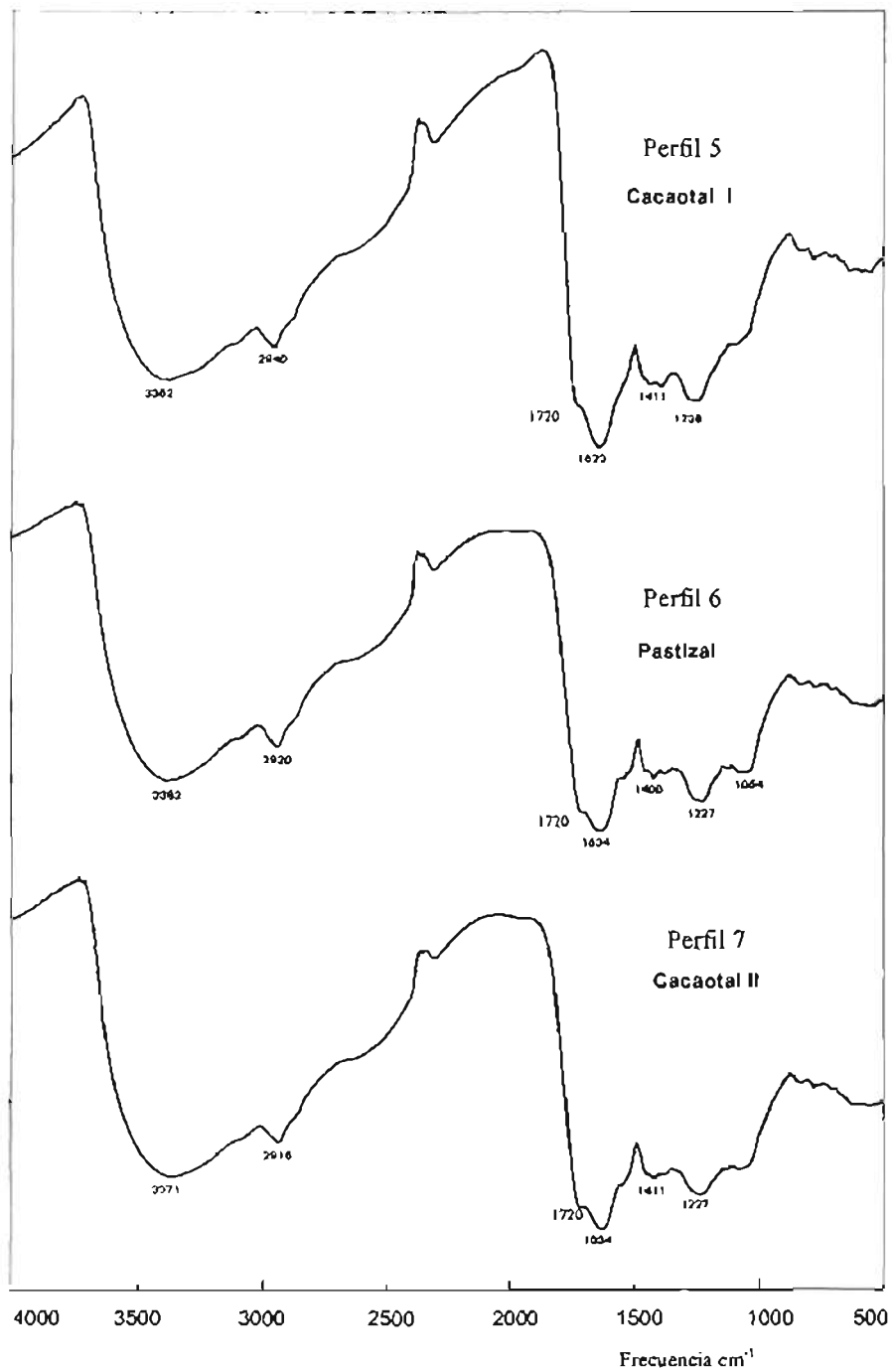


Figura 39. Espectros de infrarrojos de los AH en muestras de suelos (0-10 cm), del Estado de Tabasco, bajo diferente cubierta vegetal.

muestras superficiales (0-10 cm) de todos los sitios de muestreo (Tabla 37). Los resultados indicaron que para todas las muestras, los mayores contenidos de C orgánico se distribuyeron principalmente en la fracción más fina del suelo, es decir entre limos y arcillas.

En las Calicatas 1 y 2, el mayor contenido de C orgánico se estableció en la fracción de limos con 32.1 y 30.2 g kg⁻¹ respectivamente, coincidiendo, a su vez con las mayores proporciones de partículas minerales.

Para los suelos de origen genético los contenidos de C orgánico se encontraron en un rango muy amplio; los valores más bajos se establecieron en los suelos que reflejaron menor desarrollo genético, que corresponden a Lithic Ustorthent (Perfil 2) y Typic Ustorthent (Perfil 3). En estos perfiles la fracción dominante correspondió a las arenas (Tablas 16 y 17), aunque debe señalarse que en el Perfil 2, el mayor contenido de C orgánico se encontró en las arcillas con 2.6 g kg⁻¹ respectivamente.

Como ya se mencionó, el Perfil 1 cultivado con café, se clasificó como Thaptic Hapludand y correspondió al suelo con el mayor contenido de COT, del orden de 76 g kg⁻¹. Después del fraccionamiento de las partículas minerales, se estableció la siguiente proporción de mayor a menor: arena con 457 g kg⁻¹, arcilla con 328 g kg⁻¹ y limo con 215 g kg⁻¹ (Tabla 15), encontrándose el mayor contenido de C orgánico en la fracción arcilla con 43.1 g kg⁻¹. Al mismo tiempo, este perfil correspondió al sitio con mayor grado de humificación, ya que debe señalarse que este proceso está muy relacionado con la presencia de arcillas, debido a que tienen una considerable influencia sobre su estabilización, como lo demuestran análisis de radiocarbono en andisoles, en donde existe una correlación entre el contenido de minerales de rango corto y el COT (Harsh *et al.*, 2002; García-Calderón *et al.*, 1994).

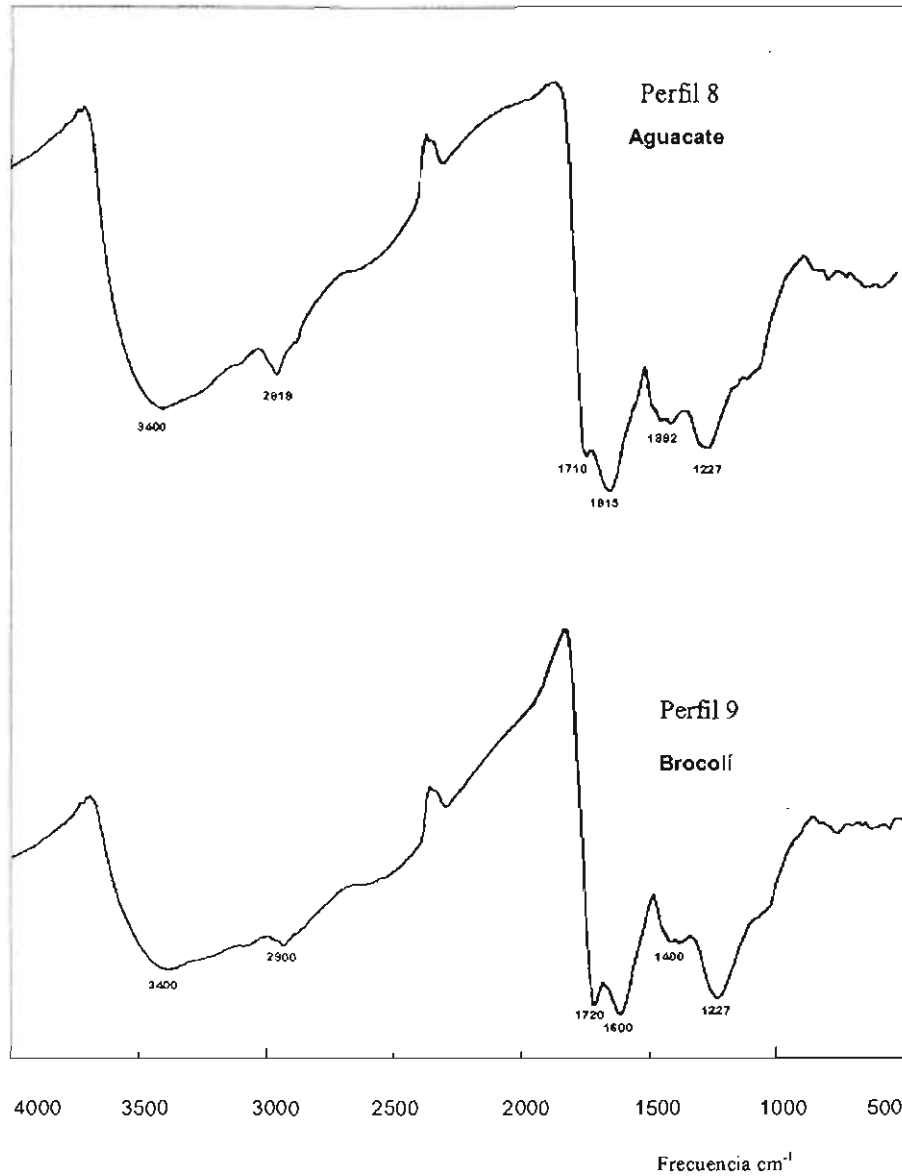


Figura 40. Espectros de infrarrojos de los AH en muestras de suelos (0-10 cm), del Estado de Michoacán, bajo diferente cubierta vegetal..

El perfil 4, cultivado con cocotal, corresponde a un Typic Ustipsamment, con textura migajón limosa en la mayor parte del perfil. Para la muestra superficial (0-10 cm) dominaron los limos con 600 g kg^{-1} (Tabla 18); Sin embargo, la mayor parte del C orgánico se encontró en la fracción arcilla con 12.5 g kg^{-1} . Normalmente, en esta categoría los suelos presentan un desarrollo incipiente, se podría mencionar que en este sitio se inicia favorablemente la formación de complejos órgano-minerales, aumentando así la estabilización del carbono y su conservación en el ecosistema, debido a que muchos tipos de arcilla se comportan como estabilizadores de la materia orgánica protegiéndolos de la degradación microbiana (Oades, 1989).

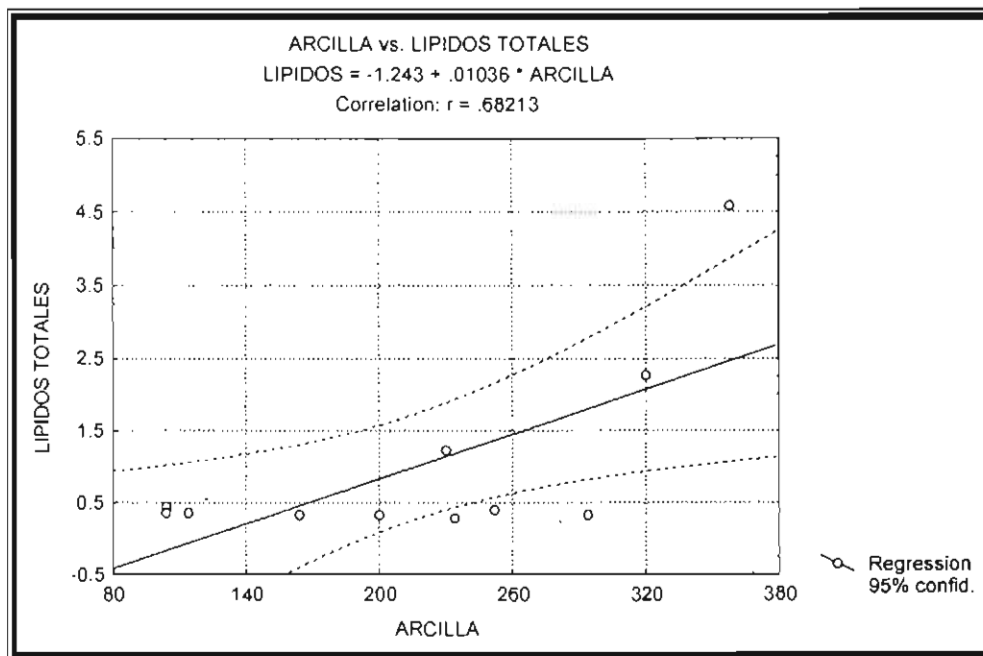


Figura 41. Análisis de regresión entre los contenidos de arcilla y el extracto lipídico total considerando todos los sitios de muestreo (calicatas y perfiles), para la profundidad de 0-10 cm.

Como ya se mencionó, en el Estado de Tabasco se realizó un muestreo de suelos en la zona de Cunduacán bajo cubierta de cacaotal; en Puyacatengo se tomaron muestras en dos sitios, los cuales correspondieron a un suelo con pastizal y el segundo sitio bajo cubierta de cacaotal. El suelo de Cunduacán se clasificó como Typic Eutrudept (perfil 5), registrando el valor más alto de COT (36 g kg^{-1}) Ahs (34 g kg^{-1}), coincidiendo con el predominio de lípidos ligados sobre los libres (Tabla 22); a partir del fraccionamiento del suelo en arenas, limos y arcillas, se encontró que el mayor valor de C orgánico se establece en la fracción limo con 14.2 g kg^{-1} .

En Puyacatengo, los Perfiles 6 y 7 se clasifican como Typic Eutrudept, los cuales contienen niveles muy cercanos de COT; por ejemplo el Perfil 6 cultivado con pastizal presentó 27 g kg^{-1} y para el Perfil 7, con cubierta de cacaotal, correspondió a 26 g kg^{-1} ; las proporciones de ácidos húmicos guardaron mayores diferencias, pues se registraron valores de 22 y 31 g kg^{-1} , respectivamente; en ambos casos los lípidos libres dominaron sobre los ligados. Sin embargo, la principal diferencia entre estos suelos radicó en la distribución del C orgánico entre sus respectivas fracciones minerales; es decir en el Perfil 7 el mayor valor con 12.9 g kg^{-1} de C orgánico se encontró en la fracción limo y en el Perfil 6, con 13.7 g kg^{-1} , se registró en la fracción arcilla. Los antecedentes de la zona nos indican que para el establecimiento del pastizal, se requirió de prácticas de manejo del terreno que correspondieron a la roza, tumba y quema, y señalarse que en los primeros 20 cm se observan abundancia pequeños residuos de carbón. Con estas prácticas pudieron presentarse cambios a nivel de la fracción órgano-mineral, ya que en algunas investigaciones se ha observado que la influencia de los incendios forestales intervienen en la evolución del humus del suelo, teniendo un efecto superior a corto plazo que los factores climáticos, geológicos o biológicos, provocando cambios acelerados en las propiedades físicas y químicas del suelo (Almendros *et al.*, 1988).

El Perfil 8 (Alfic Haplustand) y Perfil 9 (Vertic Thaptic Haplustand) fueron muestreados en el Estado de Michoacán sus valores en COT fueron 36 y 32 g kg⁻¹, y las proporciones en peso de AH de 29 y 24 g kg⁻¹ respectivamente, por lo que los resultados se mantuvieron a la mitad de los determinados en el Perfil 1 (cultivado con cafeto). Lo anterior se estableció a pesar que los suelos comparten propiedades ándicas. Sin embargo, la precipitación juega un papel importante en la conservación de la materia orgánica del suelo (Anexo I) o, en su caso, los lípidos del suelo al recubrir las superficies de los agregados, pudieron causar que tales partículas llegaran a ser hidrofóbicas con lo cual decrecer la tasa de degradación de la MOS (Naafs *et al.*, 2004a), ya que a su vez los valores más altos de extracto lipídico se determinaron en el Perfil 1 (Tablas 11, 26 y 27).

Con respecto a los lípidos ligados, pueden estar asociados directamente con la fracción fina del suelo, ya que como se mencionó la distribución del C orgánico, domina en la fracción arcilla y en segundo término en la fracción limo. En la Figura 41 se muestra que entre la fracción arcilla y el contenido de extracto lipídico total de las muestras superficiales (0-10 cm) existe una correlación significativa de $r = 0.68$. Los lípidos ligados con enlaces covalentes son probablemente menos susceptibles a transformaciones microbianas y, a su vez, pueden reflejar mejor su origen biológico (Klok *et al.*, 1988).

Para conocer mejor la participación de la fracción fina en los agroecosistemas estudiados, la fracción arcilla de muestras superficiales (0-10 cm) se analizó mediante difracción de rayos-X por el método de polvo desorientado (Figuras 42, 43, 44 y 45). En los suelos de Xochimilco y Tláhuac (calicatas) se observan principalmente minerales primarios, como los feldespatos, la muscovita y el cuarzo (Figura 42). Debe mencionarse que en la Calicata 2 (muestra 170-180 cm), también se registra el alofano con señales de 0.335 nm y 0.251 nm, así como la imogolita

con 0.335 nm, 0.37 nm, 0.204 nm, algunos de estos minerales también se reportan en Reyes (1997). Los suelos con pH ligeramente ácido tienden a favorecer la presencia de imogolita y alofano ricos en aluminio, mientras que los suelos alcalinos producen feldespatos con altos contenidos de silicio y aluminio en coordinación de tetraedro (Harsh *et al.*, 2002). Debe señalarse que en las calicatas la mayor parte del material del suelo fue transportado de zonas más elevadas con actividad volcánica importante.

En arcillas de polvo desorientadas del Perfil 1 (correspondiente al cafetal) se obtiene el difractograma de Rayos-X (DRX) (Figura 43) en donde se detecta a la haloisita deshidratada con señales (001) a 0.722 nm, 0.446 nm, 0.256 nm, 0.234 nm y 0.167 nm, que en parte se solapan con las señales propias de la kaolinita a 0.715 nm (001), 0.446 nm (020), 0.356 nm (002), 0.229 nm (131) y 0.148 nm (100). Todo ello indican que, en este sitio, existe un complejo de minerales de la arcilla del grupo de las kanditas que oscilan entre diferentes haloisitas-kaolinita. Las señales son asimétricas con ruido de fondo producido por minerales amorfos en esta muestra superficial. Además, se comprueban contenidos de gibbsita con las señales a 0.486 nm (002), 0.229 nm (312) y 0.199 nm (023) y alofano 0.335 nm y 0.250 nm. Con menor intensidad, se observaron picos de feldespatos a 0.306 nm y 0.299 nm.

Las diferentes intensidades nos indican que las arcillas dominantes corresponden a las kaolinitas y haloisitas. Este último grupo es abundante en los suelos bien desarrollados derivados de cenizas volcánicas, en climas subtropicales cercanos a los templados, correspondientes a áreas de bosque mesófilo (García-Calderón, 1997).

En estos suelos la presencia de alofano y haloisita puede ser el resultado de la alternancia estacional, secado y humedecimiento del suelo conduciendo a una baja y alta concentración de silicio, respectivamente (Harsh, *et al.*, 2002).

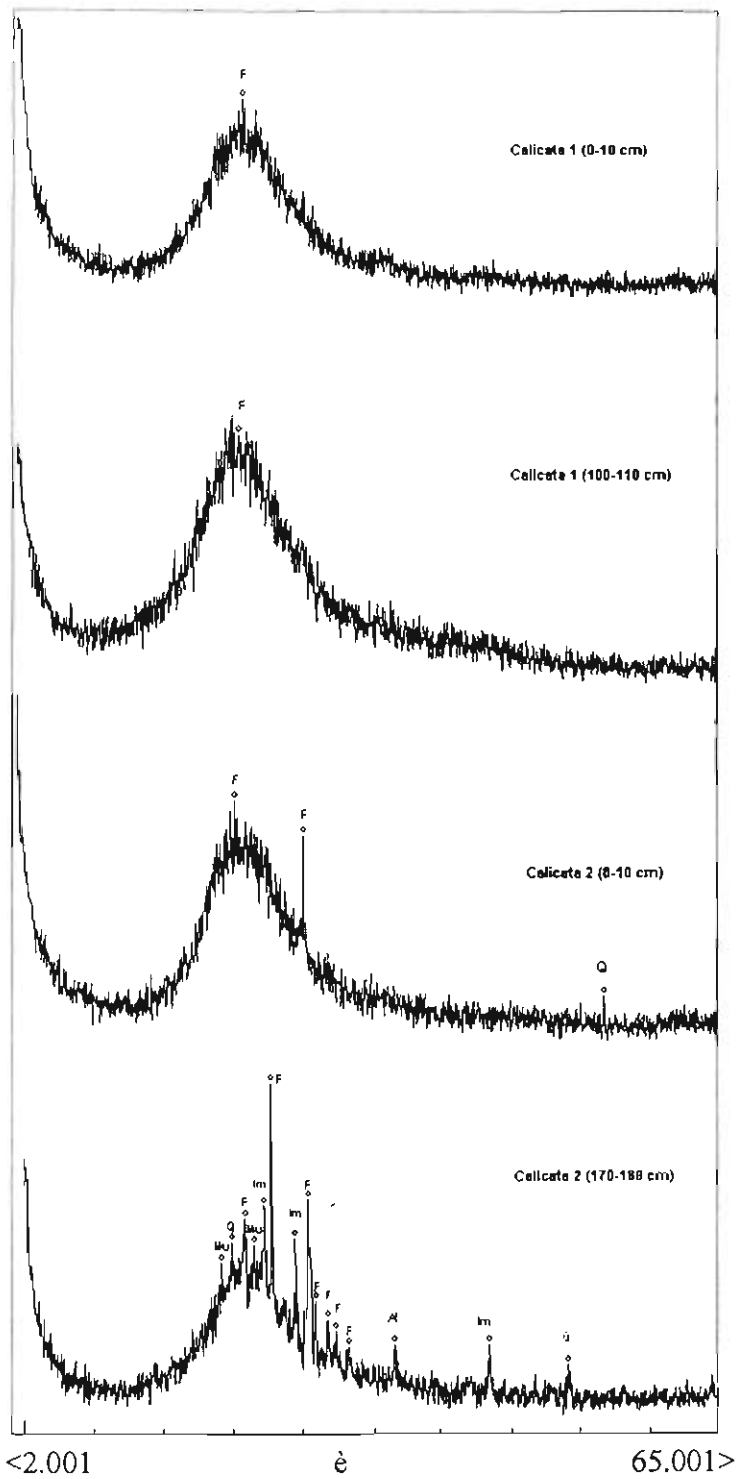


Figura 42. D-RX en suelos de los Municipios de Xochimilco (Calicata 1) y Tláhuac (Calicata 2).

Los andisoles se desarrollan de cenizas volcánicas, los cuales generalmente se consideran suelos jóvenes con 50% o más de componentes amorfos, no obstante en algunos andisoles la gibbsita se ha encontrado como uno de los minerales mayoritarios. Muchos geólogos enfatizan que el desarrollo de la gibosita es más favorable bajo condiciones de alternancia de humedad y sequía (Hsu, 1977). Normalmente, los minerales arcillosos que acompañan a la gibbsita en algunos suelos son la kaolinita y la haloisita (Solleiro, 1997).

El DRX del Perfil 2, cultivado con ajonjolí muestra señales más simétricas, aunque con bajas intensidades en relación al cuarzo (0.427 nm (100), 0.335 nm (101), 0.181 nm (112)); además se observaron feldespatos con señales a 0.402 nm, 0.351 nm, 0.322 nm y 0.299 nm. Los principales minerales de la fracción que se pudieron identificar fueron la kaolinita (0.714 nm (001), 0.270 nm (022), 0.228 nm (131), 0.224 nm (040), 0.198 nm (203), 0.184 nm (133) y 0.148 nm (100)), vermiculita (1.434 nm (002), 0.714 nm (004), 0.451 nm (020), 0.258 nm (008), 0.252 nm (202), 0.169 nm (314), 0.154 nm (2.0.14), 0.150 nm (334)) e illita (1.035 nm (001), 0.505 nm (002), 0.245 nm (131), 0.239 nm (201), 0.221 nm (132) y 0.213 nm (202)).

El DRX del Perfil 3 (cultivado con cacahuate) muestra la presencia de kaolinita (0.713 nm (001), 0.352 nm (002), 0.321 nm (111), 0.213 nm (041), 0.154 nm, 0.148 nm), illita (1.032 nm (001), 4.99 nm (002), 0.448 nm (020), 0.258 nm (200), 1.49 nm (060)) y vermiculita (1.428 nm (002), 0.713 nm (004), 0.238 nm (0.0.12), 0.197 nm (1.3.10), 0.181 nm (20.12), 1.69 nm (314)). Estos suelos presentan colores rojos muy intensos a lo largo de todo el perfil, así como reacción al HCl, por la presencia de hematita con señales de 0.270 nm y 0.252 nm y calcita 0.300 nm (104), 0.228 nm (113) y 1.63 nm (211). Aparte de los picos característicos del cuarzo en 0.426 nm (100), 0.334 nm (101), 0.245 nm (110) y 0.145 nm (113), el hierro como

revestimientos óxidos puede encontrarse precipitado en el suelo, imprimiéndole coloraciones rojas.

La hematita y la goethita son distribuidos ampliamente en los suelos, sedimentos y rocas, teniendo una alta estabilidad termodinámica. La hematita pedogenética es abundante en regiones áridas y semiáridas así como en los trópicos húmedos (Bigham *et al.*, 2002). La formación de la goethita se favorece cuando la concentración relativa de $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ es máxima, lo cual ocurre a pH 4. La hematita por otro lado, muestra una formación preferente cuando el contenido de $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ es mínimo, lo cual ocurre a pH 8 (Solleiro, 1997).

A su vez, la hematita está asociada a suelos con descomposición rápida de la materia orgánica, originado por las temperaturas altas, pH neutros (suelos calcáreos) y suelos aireados (Schertmann y Taylor, 1977); debe señalarse que los parámetros anteriores se establecen en el perfil 3.

En el Perfil 4 (cultivado con cocotal), se registra la máxima intensidad en la kaolinita con las señales de 0.729 nm (001), 0.446 nm (020), 0.355 nm (002), 0.168 nm y 0.148 nm; además, de las señales (001) cercanas de la haloisita 0.729 nm, 0.446 nm, 0.257 nm, 0.257 nm y 0.168 nm. La kaolinita es probablemente el filosilicato más ubicuo, el cual se presenta en suelos bien drenados, ambientes húmedos y templados, con alternancia de estaciones húmedas y secas White y Dixon, 2002).

Por otro lado, se observa la presencia de illita (1.035 nm (001), 0.446 nm (110), 0.262 nm (023), 0.257 nm (200), 0.243 nm (131), 0.200 nm (005), 0.153 nm (060)), cuarzo (0.424 nm (100), 0.335 nm (101), 0.243 nm (110)) y feldspatos (4.04 Å y 3.20 Å).

En el Perfil 5 existe esmectita (1.533 nm, 0.502 nm, 0.297 nm, 0.256 nm y 0.150 nm), illita (1.013 nm (001), 0.448 nm (110), 0.245 nm (131)), y kaolinita (0.711 nm (001), 0.353 nm (002), 0.197 nm (203), 0.182 nm (133), 0.154 nm), además de cuarzo (0.426 nm (100), 0.335 nm (101), 0.228 nm (102) y 0.212 nm (200)) y feldespatos (0.369 nm y 0.321 nm) (Figura 44). Debe señalarse que en este suelo existe un predominio de lípidos ligados (0.21 g kg^{-1}) sobre los libres (0.19 g kg^{-1}). En algunas investigaciones se ha reportado que la montmorillonita (saturada con calcio) presenta la capacidad de formar complejos con ácidos grasos (Theng, 1974). Aunque en el Perfil 6 se registra la presencia de esmectita no hay dominio de los lípidos libres sobre los lípidos ligados, pudiendo influir en este comportamiento la alteración del suelo por el fuego.

Con respecto al Perfil 6, se identifican los siguientes minerales en la fracción de arcilla: esmectita (1.482 nm, 0.256 nm, 0.228 nm, 0.169 nm y 0.150 nm), illita (1.012 nm (001), 0.497 nm (002), 0.448 nm (110), 0.235 nm (022), 0.223 nm (132), 0.212 nm (202) y 0.197 nm (133)) y kaolinita (0.714 nm (001), 0.353 nm (020), 0.182 nm (133), 0.166 nm y 0.154 nm). En los ambientes donde los cationes tienden a ser retenidos por el suelo, se estimula la formación pedogenética de esmectita e illita, pero si el medio se empobrece en cationes potasio, magnesio o calcio, por efectos de lavado intenso y acelerado, habrá tendencia a que se formen minerales del grupo de los Kaolines (Vallejo, 1997).

Para el Perfil 7, las señales indican la presencia de esmectita (1.412 nm, 0.497 nm, 0.352 nm), illita (1.032 nm (001), 0.448 nm (110), 0.257 nm (200), 0.245 nm (131), 0.212 nm (202) y 0.150 nm (060)), kaolinita (0.713 nm (001), 0.228 nm (131), 0.187 nm (042) y 0.153 nm) (Figura 44).

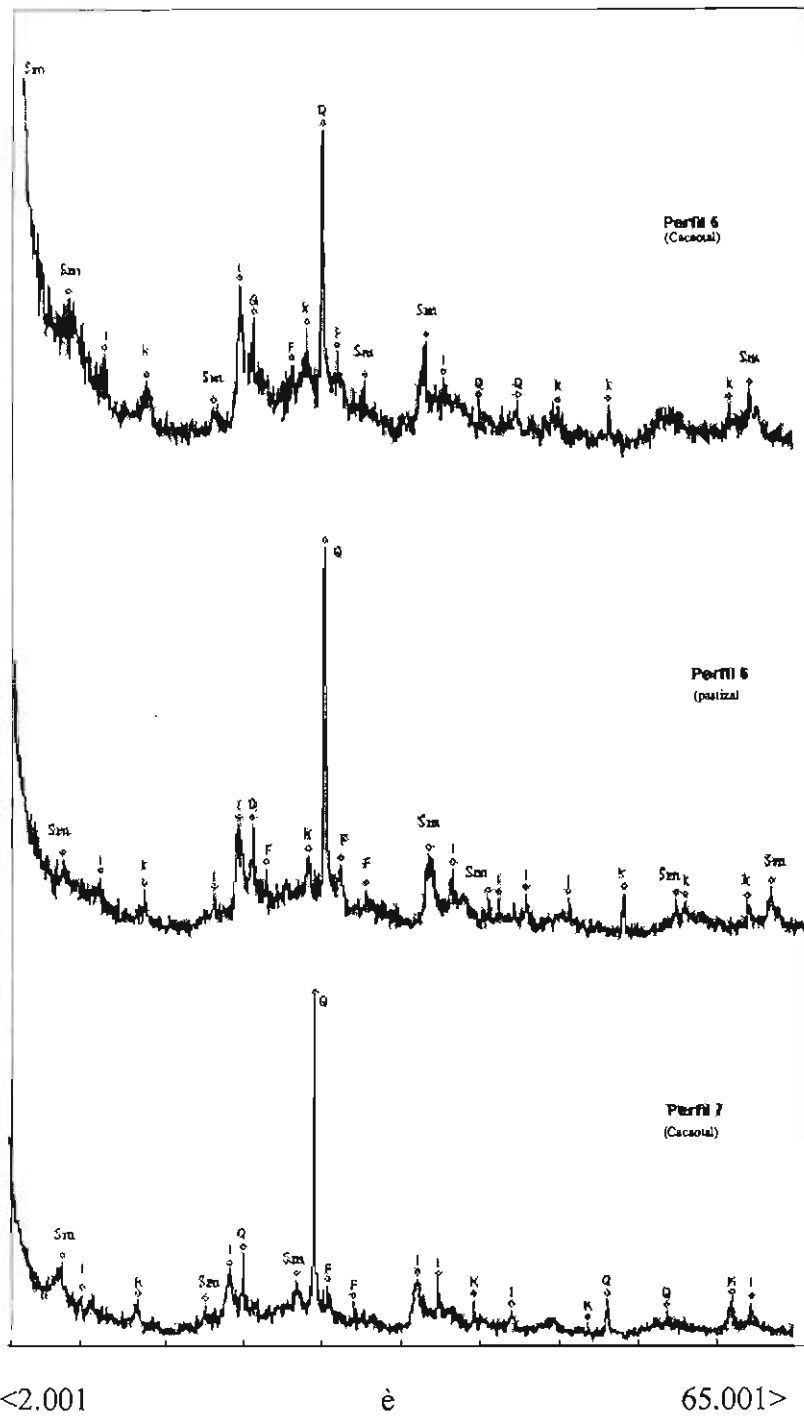


Figura 44. D-RX en suelos (0-10 cm) de Estado de Tabasco.

La kaolinita, como la illita, son arcillas que se presentan en la mayoría de los perfiles muestreados (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7). La abundancia de las illitas con excepción en el Perfil 1 se explica debido a que el material parental del suelo es abundante en micas, cuya fuente primaria la constituyen las rocas ígneas (Vallejo, 1997). Los minerales micáceos comúnmente se incrementan con la profundidad, ya que el intemperismo intenso se presenta principalmente en la superficie del suelo, el cual ha transformado los minerales micáceos a minerales secundarios tales como la vermiculita, esmectita o kaolinita (Thompson y Ukrainczyk, 2002). Finalmente, en los perfiles del Estado de Michoacán se identifican las siguientes arcillas, para el Perfil 8 (cultivado con aguacate) la haloisita (0.738 nm, 0.443 nm y 0.359 nm), imogolita (0.252 nm, 0.238 nm, 0.166 nm, 0.148 nm), así como algunos feldespatos (0.405 nm y 0.321 nm) y el cuarzo (0.432 nm (100)). Las haloisitas se observan en los perfiles 1, 4, 8 y 9, que corresponden a suelos que presentan intemperismo intenso, en ambientes húmedos con lavado del suelo, además estos suelos se reconocen por sus densidades aparentes bajas, ya que usualmente contienen cantidades significativas de materiales amorfos (Lynn *et al.*, 2002; White y Dixon, 2002).

Como ya se mencionó, la sección superficial del Perfil 9 (cultivado con brócoli) está formado, con material ándico proveniente de zonas más elevadas, reflejándose lo anterior en el material arcilloso, ya que se detectaron halositas (0.743 nm, 0.443 nm, 0.365 nm, 0.236 nm, 0.148 nm, y 0.147 nm), alofano (0.356 nm y 0.253 nm) y feldespatos (0.321 nm).

Por consiguiente, la caracterización de la fracción órgano-mineral nos da información mas precisa sobre la tendencia de los suelos hacia su estabilización o degradación. Estos componentes del suelo presentan diversos grados de alteración en función al uso y manejo de los suelos, como se observa en los diferentes sitios de muestreo. Por lo tanto, la cuantificación

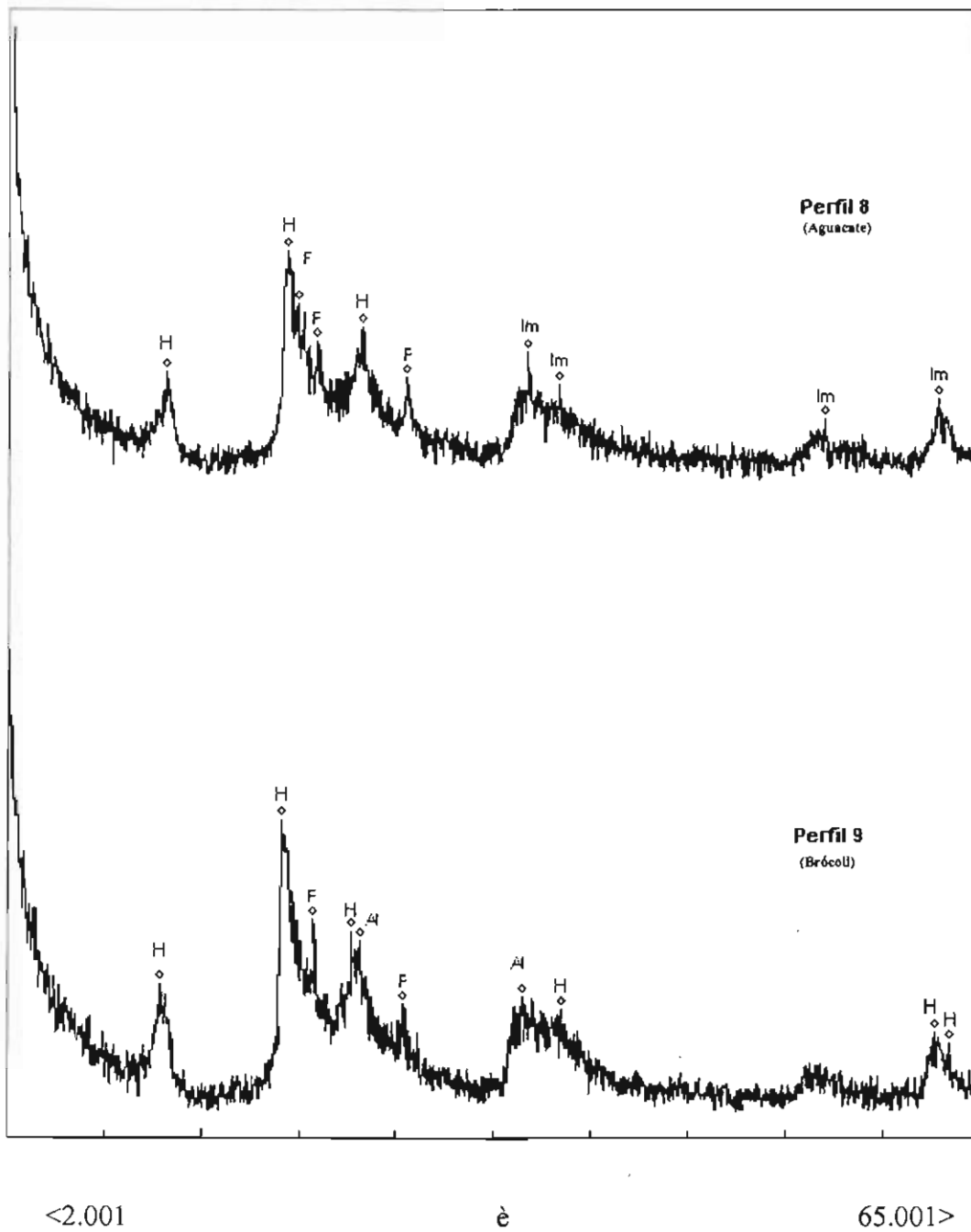


Figura 45. D-RX en suelos (0-10 cm) del Estado de Michoacán.

e identificación de arcillas y los AHs, en su caso, son importantes en el estudio del funcionamiento de los ecosistemas, ya que afectan la calidad del suelo a diferentes niveles, como resultado de su capacidad en inmovilizar compuestos xenobióticos, metales pesados o biomoléculas. Debe mencionarse que, a pesar de su complejidad estructural y tamaños moleculares elevados, los AHs, pueden estudiarse por medio de diferentes metodologías como son la espectroscopia visible y de infrarrojo, y la cuantificación e identificación de compuestos lipídicos libres y ligados, ya que se trata de compuestos con un mayor tiempo de residencia en el suelo en relación con otras biomoléculas (aminoácidos, proteínas, azúcares, etc.) (Higashi y Wada, 1985; Hita *et al.*, 1996).

Con todo lo anterior, es posible mencionar que, tanto los factores formadores, como los componentes del suelo pueden participar activamente en la estabilidad de la MOS y, por consiguiente, en la conservación de los ecosistemas. En este capítulo, se resalta el papel de algunos componentes del suelo, como por ejemplo las fracciones minerales, el carbono orgánico total y sus distintas formas (substancias húmicas y extractos de lípidos totales). Es posible observar que la combinación de estos componentes favorece la estabilidad de la MOS y es en el Perfil 1 y Calicata 1 donde se presenta una mayor estabilidad de la MOS, así como la presencia de alofano. En el primer caso los suelos bajo café presentan el mayor contenido de COT (76 g kg^{-1}), de extracto lipídico total (4.58 g kg^{-1}), proporción importante de AHs (46 g kg^{-1}), y a su vez debe mencionarse que el mayor contenido de C orgánico se encuentra en la fracción arcilla, además de clasificarse como migajón arcilloso. La Calicata 1 (suelo antropogénico) es un suelo donde la combinación de los componentes estabilizan activamente a la MOS, se caracterizan por tener 73 g kg^{-1} de COT, 2.27 g kg^{-1} de extracto lipídico total, de

78 g kg⁻¹AHs, el C orgánico está distribuido significativamente en limos y arcillas y su clase textural corresponde a migajón arcillo limoso.

El agroecosistema cafetalero (Perfil 1) tiene ventaja sobre otros cultivos ya que constituye un sistema que conserva la humedad del suelo, reduce la erosión y al mismo tiempo sus propiedades intrínsecas proporcionan cierto grado de estabilidad a la materia orgánica del suelo, reflejándose en los niveles significativos del extracto lipídico total.

VI. CONCLUSIONES.

En la presente investigación se ha abordado la relación entre los factores edafogenéticos y la distribución de extractos lipídicos en suelos con desarrollo antrópico y genético de diversos agroecosistemas del país. Del análisis de los resultados obtenidos cabe señalar las siguientes conclusiones:

1) Las condiciones anaeróbicas que prevalecen en los suelos antrópicos (Calicata 1 y Calicata 2), favorecen que el COT tienda a incrementarse con la profundidad; y en relación a los suelos de Tláhuac se refleja un incremento concomitante entre el COT y el extracto lipídico total.

2) En los suelos antrópicos las muestras que presentan los valores más elevados de extracto lipídico, corresponden a las profundidades inferiores con 5.15 g kg^{-1} (Calicata 1) y 13.0 g kg^{-1} (Calicata 2).

3) En los suelos antrópicos existe una mayor similitud entre las capas superficiales de ambos sitios y entre las capas más profundas, por lo que existe una variabilidad vertical independiente al uso del suelo, por lo que el ambiente hidromórfico juega un papel clave en este comportamiento.

4) En los suelos de origen genético la distribución de los compuestos lipídicos se concentra en los primeros centímetros del perfil, relacionándose principalmente con la actividad biológica y aportes de la vegetación.

5) El perfil 1 presenta una clara diferenciación en relación a los demás sitios de estudio, como lo demuestra el análisis de componentes principales. Reflejado en los altos contenidos del extracto lipídico (4.48 g kg^{-1}) y AH (46 g kg^{-1}), correspondiendo al sitio con el mejor balance entre humificación y mineralización.

6) En el agroecosistema cafetalero se observa la mayor estabilidad de la MOS, ya que es en éste donde concurren importantes factores que favorecen la acumulación de humus (pH ácido, arcillas del tipo alofano y haloisitas, relaciones C/N entre de 7 y 9, temperatura media anual y precipitación favorables para la estabilidad de la MOS).

7) El dominio de los lípidos ligados sobre los lípidos libres se establece principalmente en los suelos con mayor humificación.

8) El carbono orgánico total del suelo se enlaza principalmente con las fracciones finas del suelo –limo y arcilla– y en mayor proporción en los suelos con desarrollo genético se establece en la fracción arcilla.

9) En los espectros de infrarrojo de los ácidos húmicos se observa mayor intensidad en la región de 1600 cm^{-1} que corresponde a vibraciones C=C en anillos aromáticos, en relación a las señales a 2920 cm^{-1} con vibraciones de grupos alquilos CH_2 alifáticos.

10) No se observan correlaciones entre el contenido de arcilla y la CIC; sin embargo, el intemperismo intenso de los suelos tropicales del Estado de Tabasco, favorece la formación de

illitas y esmectitas, por lo que la CIC de estos suelos se considera adecuada. En los suelos del Estado de Michoacán se observan los valores más altos de CIC, como resultado de la presencia de las arcillas del tipo de haloisita, imogolita y alofano.

11) La caracterización molecular del extracto lipídico mediante CG/EM permite identificar una serie de biomarcadores, que indican una importante contribución de plantas terrestres, por la aportación de determinados tipos de *n*-alcanos, y *n*-ácidos grasos (ambos con más de 22 átomos de carbono), y la presencia de esteroides, y de triterpenos de tipo oleano, ursano, y taraxerol.

12) En la mayoría de las muestras se observa la influencia de la actividad microbiana, a partir de la identificación de triterpenos de tipo hopano, *n*-alcanos, y *n*-ácidos grasos (ambos con menos de 22 átomos de carbono); además se observa actividad fúngica manifestada por el ergosterol.

13) La extracción con fluidos supercríticos, como un método alternativo para la recuperación de compuestos lipídicos en suelos es adecuada, ya que reduce el tiempo de extracción y tamaño de muestra.

14) El análisis de correspondencia canónica indica que el nitrógeno, ácidos húmicos y la temperatura son las variables que mejor explican la distribución observada de los *n*-alcanos.

15) Al mismo tiempo la distribución y diversidad del grupo de los *n*-ácidos grasos está relacionado principalmente con el carbono, extracto lipídico total y la pendiente.

16) Las variables ambientales y los parámetros del suelo que se seleccionaron para su tratamiento estadístico explican significativamente la variabilidad en los datos. En el análisis de componentes principales explican el 74.3% de la varianza total y en los análisis de correspondencia canónica el 80.6% y 89.4% de la varianza total.

17) Con lo anterior podemos establecer que se confirma la hipótesis planteada, puesto que a partir de los análisis estadísticos se demuestra que las variables ambientales: pendiente, altitud, precipitación, temperatura, así como la cobertura vegetal (anual y perenne) presentan correlaciones significativas con los parámetros clave del suelo, que actúan sobre los contenidos del extracto lipídico total en los sitios de muestreo.

18) La caracterización molecular del extracto lipídico total de los suelos, así como el grado de humificación y la determinación de la fracción mineral (relación del carbono orgánico con las partículas del suelo y la identificación de las arcillas), representan parámetros adecuados para establecer indicadores en los procesos edafogénicos y en las ciencias medioambientales.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Almendros, G., Martin, F., González-Vila, F.J, Martínez, A.T. 1987. Melanins and lipids in *Lycoperdon perlatum* fruit bodies. Trans. Br. Mycol. Soc. 894:533-537.
- Almendros, G., Martin, F., González-Vila, F.J. 1988. Effects of fire on humic and lipid fraction in a Dystric Xerochrept in Spain. Geoderma 42:115-127.
- Almendros, G., González-Vila, F.J., Martin F. 1989. Alteraciones del humus en bosques mediterráneos continentales afectados por incendios. Options Méditerranéennes Série Séminaires 395-399.
- Almendros, G., Sanz, J., González-Vila, F.J., Martin, F. 1991. Evidence for a polyalkyl nature of soil humin. Naturwissenschaften, 78:359-362.
- Almendros, G., Sanz, J., Velasco, F. 1996. Signatures of lipid assemblages in soils under continental Mediterranean forests. Eur. J. Soil Sci. 47:183-196.
- Almendros, G. 2000. Procesos de transformación de la materia orgánica en ecosistemas agrícolas e inalterados, 330-343 pp. In: Quintero L.R., Reyna, T.T., Corlay, Ch.L., Ibañez, H.A. García-Calderón, N.E. (eds.) La Edafología y sus Perspectivas al Siglo XXI. Tomo I. CP-UNAM-UACH, México.
- Almendros, G., Tinoco, P., González-Vila, F.J., Lüdemann, H.-D., Sanz, J., Velasco, F. 2001. ¹³C-NMR of forest soil lipids. Soil Sci. 166:186-196.
- Alonso, V. R. 1987. Contribución de la hojarasca al ciclo de nutrientes, dinámica nutrimental de las hojas y distribución radical del árbol de cacao (*Theobroma cacao* L.). Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, 125 p.

- Ambler, A., Jacquesy, J.C., Tejada, A., Jambu, P., Fustec E. 1983. Origin and dynamic of lipids in a podzol. VII International Symposium Vol. I : 5-8 Prague.
- Ambler, A., Jambu, P., Jacquesy, J.C., Porlanti, E., Secouet, B. 1993. Changes in the ketone portion of lipidic components during the decomposition of plant debris in a hydromorphic forest podzol. *Soil Sci.* 156:49-56.
- Ander, P., Sonnessa, A.J. 1982. Principios de Química. Introducción a los Conceptos Teóricos. Limusa, México, 845 p.
- Anderson, D.W., Sagar, S., Bettony, J.R., Stewart, J.W.B. 1981. Particle size fractions and their use in studies of soil organic matter. I. The nature and distribution of forms of carbon, nitrogen and sulfur. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:767-772.
- Aquino Neto F.R., Trendel J.M., Connan J., Albrecht P. 1983. Occurrence and formation of tricyclic and tetracyclic terpanes in sediments and oils. 659-667. Bjoroy M. (ed.) *In: Advances in Organic Geochemistry 1981*. Wiley-Heydon, Chichester.
- Battaner, A.E. 1993. Biomoléculas. Ediciones Universidad de Salamanca, España, 79-155 pp.
- Baver, L.D. 1956. *Soil Physics*. John Wiley and Sons. Inc. New York.
- Berg, B.E., Lund H.S., Kringstad, A., Kvernheim, A.L. 1999. Routine analysis of hydrocarbons, PCB and PAH in marine sediment using supercritical CO₂ extraction. *Chemosphere.* 38: 587-599.
- Bigham, J.M., Fitzpatrick, R.W., Schulze, D. G. 2002. Iron Oxides, 323-366 pp. In: J.B. Dixon, D.G. Schulze. *Soil mineralogy with environmental applications*. 2a ed. Num. 7 in the Soil Science Society of America Book series 7, SSSA.
- Boul, S.W., Hole, F.D., McCracken, R.J. 1981. Génesis y clasificación de los suelos. Ed. Trillas, México, 417 p.

- Bouyoucos, G.J. 1936. Directions for marking mechanical analysis of soils by hydrometer method. *Soil Sci.* 42:225-229.
- Braids, O.C., Miller, R.H. 1975. Fats, waxes, and resins in soil. *In: J.E. Gieseking (ed.). Soil Components Vol 1, Chap. 6, Organic Components, 343-368 pp.*
- Breger, I.A. 1973. Geochemistry of lipids. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 43:197-202.
- Brindley, G.W., Mac Ewan, D.M.C. 1951. X-ray identification and crystal structures of clay minerals. Mineralogical Society (Clay Mineral Group). London. 306-319 pp.
- Brindley, G.W., Brown, G. 1984. Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society. Great Britain. Mineralogical Society, 495 p.
- Capriel, P., Beck, T., Borchert, H., Härter, P. 1990. Relationship between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass, and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:415-420.
- CETENAL. 1976. Carta topográfica. Hoja Ciudad de México. E14-A39. Escala 1:50,000.
- Cuanalo, C.H. 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelos en el campo. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México 40 p.
- Chae, Y.M., Lowe, L.E. 1981. Fraction by column chromatography of lipids and lipid sulphur extracted from soils. *Soil Biol. Biochem.* 13:257-260.
- De Chávez; M.M., Hernández, M., Roldán, J.A. 1992. Tablas de uso práctico del valor nutritivo de mayor consumo en México. Comisión Nacional de Alimentación, INNSZ, México, 70 p.
- Del Río, J.C., González-Vila, F., Martín, F. 1990. Ceras fósiles en turbas y lignito. Composición química y significado geoquímico. *Anal. Quim.*, 87:217-222.

- Deng, Y., Dixon, J.B. 2002. Soil organic matter and organic-mineral interactions. 69-107 pp.
- Didyk B.M., Simoneit B.R.T., Brassell S.C., Eglinton G. 1978. Organic geochemical indicators of paleoenvironmental conditions of sedimentation. *Nature* 272:216-222.
- Digby, P.G.N., Kempton, R.A. 1987. Multivariate analysis of ecological communities. Chapman and Hall. New York, 386 p.
- Dinel, H., Schnitzer, M., Mehuys, G.R. 1990. Soil lipids: Origin, nature, contents, decomposition, and effect on soils physical properties, 397-422 pp. *In*: Bollag J.-M.; Stotzky G. (eds.). *Soil Biochemistry* Vol. 6, Marcel Dekker, Inc. New York.
- Duchaufour, P. 1984. *Edafología. I. Edafogénesis y Clasificación*. Masson, Barcelona, 493 p.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1998. Method 3540C. Soxhlet extraction. Revision 2 November 1998.
- Evershed, R.P. 1992a. Gas chromatography of lipids, 113-151 pp. *In*: Hamilton, R.J., Hamilton, S. (eds.). *Lipid Analysis. The Practical Approach Series*, Oxford.
- Evershed, R.P. 1992b. Mass spectrometry of lipids, 113-151 pp. *In*: Hamilton, R.J., Hamilton, S. (eds.). *Lipid Analysis. The Practical approach Series*, Oxford.
- Fisher, D.J., Holloway, P.J., Richmond, D.V. 1972. Fatty acid and hydrocarbon constituents of the surface and wall lipids of some fungal spores. *J. Gen. Microbiol.* 72:71-78.
- Fridland, Ye.V. 1982. Some characteristics of soil lipids as a function of ecological conditions. *Soviet Soil Sci.* 14:80-88.
- Fortún, C., Almendros, G., Polo, A. 1986. Efecto de fracciones de tipo húmico extraídas de paja de trigo composteada sobre el crecimiento y contenido mineral de plantas rye-grass. *Agrochimica* 30:229-240.

- Galoppini, C., Riffaldi, R. 1969. Composizione acidica dell'estratto etereo del terreno. *Agrochimica* 13:207-211.
- García-Calderón, N., Galicia, P.M.S., Aguilera, H.N., Reyes, O.A.L. 1994. Organic matter and humic substances contents in chinampas soils from Xochimilco-Tlahuac areas (México). *Proceedings 15th Int. Congr. Soil Sci.* 3:368-383.
- García-Calderón, N., Galicia, P.M.S., Aguilera, H.N. 1996. Silicofitolitos de la zona chinampera de Xochimilco-Tláhuac, D.F. (México). *In: Primer Encuentro Europeo de Fitolitos*. CCMA, CSIC.
- García-Calderón, N. 1997 Arcillas del grupo del caolín. 103-125 pp. *In: Adolfo E. Cordero Borboa (ed.) Apuntes del Curso de Cristalografía de suelos*. Sociedad Mexicana de Cristalografía. Insituto de Física, UNAM.
- García-Mollá, J. 1994. Análisis de biomarcadores y geopolímeros en diferentes estratos de pizarras bituminosas de la Cuenca de Puertollano. Tesis Doctoral, Sevilla, España, 265 p.
- García, M.E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México, 217 p.
- Gelpí, E., Scheider, H., Mann J., Oró, T. 1970. Hydrocarbons of geochemical significance in microscopic algae. *In: I. Kaplan (Ed.) Phytochemistry Corp.*
- Gómez, R.H., García, O.A. 1989. Curso-Taller de interpretación de espectros de masas. Facultad de Química, UNAM, 116 p.
- González-Vila, F.J., Martín, F., Verdejo, T. 1984. Influencia del aporte de compost sobre la fracción húmica del suelo. II Congreso Nacional de Recuperación de Recursos de los Residuos, 59-67 pp Soria, España.

- González-Vila, F.J., Martín F., Verdejo T. 1985. Changes in the lipidic fraction of soil resulting from composted municipal refuse application. *Agrochimica* Vol. 29 2-3-4:210-219.
- González-Vila, F.J., Verdejo, T., Martín, F. 1992. Characterization of wastes from olive and sugarbeet processing industries and effects of their application upon the organic fraction of agricultural soils. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 46:213-222.
- González-Vila, F.J., Bautista, J.M., Del Río, J., Martín, F. 1995. Evolution of chemicals within the dump profile in a controlled landfill. *Chemosphere* 31:2817-2825.
- González-Vila, F.J., Mancha, A., Almendros, G., Martín, F., Del Río, J.C. 1996a. Changes in the physicochemical characteristics and lipid composition in sediments from productive aquaculture ponds after a short-term shrimp growth experiment. *Aquaculture* 144:121-131.
- González-Vila, F.J., Del Río, J.C., Mancha, A., Bautista, J.M., Martín, F. 1996b. Origin and environmental significance of organic deposits in aquatic sediments. *Fresenius Envir. Bull* 5:161-166.
- Goñi, M.A., Yunker, M.B., Macdonald, R.W., Eglinton, T.I. 2005. The supply and preservation of ancient and modern components of organic carbon in the Canadian Beaufort Shelf of the Arctic Ocean. *Marine Chemistry* 93:53-73.
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D.A., Monreal, C.M., Ellert, B.H. 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74:367-385.
- Gurr, M.I., James, A.T. 1980. *Lipid biochemistry. An Introduction.* Great Britain University, Press, Cambridge, 247 p.

- Haider, K., Huang, P.M. 1994. Impact of mineral-organic association on agricultural ecosystem health. *In*: 15th International Congress of Soil Science, Vol. 3:611-633
- Harsh, J., Chorover, J., Nizeyimana, E. 2002. Allophane and Imogolite, 291-321. *In*: J.B. Dixon, D.G. Schulze. Soil mineralogy with environmental applications. 2a ed. Num. 7 in the Soil Science Society of America Book series 7, SSSA.
- Hawthorne, S.B. 1990. Analytical-scale supercritical fluid extraction. *Analytical chemistry* 6:633-642.
- Hawthorne, S.B., Miller, D.J. 1986. Extraction and recovery of organic pollutants from environmental solids and tenax-GC using supercritical CO₂. *Journal of Chromatography* 24:258-264.
- Hawthorne, S.B., Miller, D.J. 1987. Extraction and recovery of polycyclic aromatic hydrocarbons from environmental solids using supercritical fluids. *Analytical Chemistry* 59:1705-1708.
- Higashi T., Wada K. 1985. Size fractionation, dissolution analysis, and infra-red spectroscopy of humus complexes in Ando soils. 653-663 pp.
http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ar_comagri.html
- Hita, C., Parlante, E., Jambu, P., Jaffé, Amblès, A. 1996. Triglyceride degradation in soil. *Org. Geochem.* 25-19-28.
- Hostettler, F.D., Pereira, W.e, Kvenvolden, K.A., VanGreen, A. Luoma N., Fuller, Ch.C., Aima, R. 1999. A record of hydrocarbon input to San Francisco Bay as traced by biomarker profiles in surface sediment and sediment cores. *Marine Chemistry* 64:115-127.

- Hsu, P.H., 1977. Aluminum hydroxides and oxyhydroxides, 143-199. In: J.B. Dixon, S.B. Weed. Minerals in soil environments. Soil Science Society of America , Madison, Wisconsin, USA.
- Ibáñez, H.A., Fuentes, R.E., Mercado S.I., Ramos B.R., García-Calderón, N.E, 2001. Differential salinity in soils of chinampa agroecosystems from Mexico City (Mexico). SPUSH 2001. IV Simposio de la Red Global de FAO sobre Gestión Integrada del Suelo para el Uso Sostenible de Suelos Afectados por Sales. Valencia, España del 7-11 de mayo 2001.
- INEGI. 1982. Carta Topográfica. Hoja Amecameca E14-B41 Ciudad de México-México. Escala 1:50,000.
- INEGI. 1985. Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán, 316 p, México.
- INEGI. 1986. Síntesis Geográfica del Estado de Tabasco, 103 p, México.
- INEGI. 1987. Carta Topográfica. Hoja Zamora E13-B19 Michoacán. Escala 1:50,000, México.
- INEGI. 1990. Carta topográfica. Hoja Chalco E14-B31 Ciudad de México. Escala 1:50,000, México.
- INEGI. 1990. Carta topográfica. Hoja Iguala E14-A78 Guerrero. Escala 1:50,000, México.
- INEGI. 1990. Carta topográfica. Hoja Teapa E15-D21 Tabasco. Escala 1:50,000, México.
- Jackson, M.L. 1982. Análisis Químico de Suelos. Omega, Madrid, 662 p.
- Jaffé, R., Elismé, T., Cabrera, A.C. 1996. Organic geochemistry of seasonally flooded rain forest soils: molecular composition and early diagenesis of lipid components. Org. Geochem. 25(1/2):9-17.

- Jambu, P., Fustec, E., Jacquesy, R. 1978. Les lipides des sols: nature, origine, evolution propriétés. Bulletin A.F.E.S. (Association Francaise pour l'Étude du Sol) 4,229-240.
- Jambu, P., Coulibal, G., Bilong, P., Magnoux, P., Amblès, A. 1983. Influence of lipids on the physical properties of soil. VII International Symposium Vol. I, 46-50 pp.
- Jambu, P., Amblès, A., Magnoux, P., Parlanti, P. 1995. Effects of addition of clay minerals on the fatty acid fraction of a podzol soil. European Journal of Soil Science 46:187-192.
- Jasso, C.C. 1997. Caracterización de los suelos de algunas cafetaleras en los Estados de Oaxaca y Guerrero. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, 115 p.
- Kaiser, K., Guggengerger, G. 2003. Mineral surfaces and soil organic matter. European Journal of soil Sci. 54:219-236.
- Kang, S., Amarasiriwardena, D., Veneran, P., Xing, B. 2003. Characterization of ten sequentially extracted humic acids and huminin from a soil in western Massachussets. Soil Sci. 168, 880-887.
- Killops, D., Killops, V.J. 1993. An introduction to organic geochemistry. Longman Scientific and technical. Co-published in the United States with John Wiley Sons. Inc. New York, 265 p.
- Klok, J., Baas, M., Cox C., Leevw, J.W., Rupstra, W.I.C. 1988. The mode of occurrence of lipids in a Namibian Shelf diatomaceous ooze with emphasis on the β -hydroxy fatty acids. Organic Geochem. 12:75-80.
- Kononova, M.M. 1982. Materia Orgánica en el Suelo, su naturaleza, propiedades y métodos de investigación. Oikos-Tau, Barcelona 21-79, 249-323 pp.

- Kowalenko, C.G. 1978. Organic nitrogen, phosphorus and sulfur in soils, 95, 108-110, 117-120, 125 pp. *In*: Schnitzer, M., Khan, S.U. (eds.) *Developments in Soil Science* 8, Elsevier Scientific Publishing Co. The Netherlands.
- Li, C.Y. 1978. Soil fatty acids under alder, conifer and mixed alder-conifer stands of Costa Oregon. *Soil Sci.* 125:92-94.
- Lichtfouse, E., Wehrung, P., Albrecht, P. 1998a. Plant wax *n*-alkanes trapped in soil humin by non covalent bonds. *Naturwissenschaften* 85:449-452.
- Lichtfouse, E., Leblond, C., Da Silva, M., Behar, F. 1998b. Occurrence of biomarkers and straight-chain biopolymers in humin: Implication for the origin of soil organic matter. *Naturwissenschaften* 85:497-501.
- Lichtfouse, E. 1998c. Isotope and biosynthetic evidence for the origin of long-chain aliphatic lipids in soils. *Naturwissenschaften* 85:76-77.
- Lichtfouse, E., Dou, S., Girardin, C., Grably, M., Balesdent, J., Behar, F., Vandenbroucke, M. 1995. Unexpected ¹³C-enrichment of organic components from wheat crop soils: evidence for the in situ origin of soil organic matter. *Organic Geochemistry* 23:865-868
- Luque, C.M.D., Valcárcel, M., Tena M.T. 1993. *Extracción con Fluidos supercríticos en el Proceso Analítico*. Reverté, S.A., Barcelona, 468 pp.
- Lynn, W.C., Ahrens R.J., Smith A.L. 2002. Soil mineral, their geographic distribution and soil taxonomy, 691-709 pp. *In*: J.B. Dixon, D.G. Schulze. *Soil mineralogy with environmental applications*. 2a ed. Num. 7 in the Soil Science Society of America Book series 7, SSSA.
- Marlow, J.R., Farrimond, P., Rosell-Mellé, A. 2001. Analysis of lipid biomarkers in sediments from the Benguela Current coastal upwelling system (site 1080). *In*: Wefer, G., Berger,

- W.H., Richter, C. (eds) Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results Volume 175:1-26.
- Martínez, R.R.I. 1993. Estudio químico de las fracciones húmicas y lipídicas en suelos de diferente origen. Memorias del XXX Curso de Edafología y Biología Vegetal. IRNAS. CSIC.
- Mercado, S.I. 1993. Respuesta de un suelo salino sódico de San Luis Tlaxiátemalco, D.F., a la aplicación de mejoradores biológicos, químicos e hidrotécnicos, a nivel invernadero. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM, México, 120 p.
- Mercado, S.I., García-Calderón, N., Ibañez, A., Martín, F. 2000. Composition of soil lipids in two chinampas agroecosystems from Xochimilco and Tlahuac Municipalities, Mexico. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31(7/8): 1003-1016.
- Millar, C.E., Turk, L.M., Foth, H.D. 1979. *Fundamentos de la Ciencia del Suelo*. CECSA, México, 41-81 pp.
- Moore, M.D., Reynolds, R.C. Jr. 1997. *X-Ray Diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford University Press U. 378 p.
- Mooser, F. 1963. La cuenca del Valle de México. Mesas redondas para el Valle de México, 12-16 de noviembre. Instituto de Recursos Naturales Renovables, México, 3-48 pp.
- Moucawi, J., Fustec, E., Jambu, P., Amblès, A., Jacquesy, R. 1981. Biooxidation of added and natural hydrocarbons in soils: effect of iron. *Soil Biol. Biochem.* 13:335-342.
- Munsell. 1992. *Soil Color Charts Edition Munsell Color Co.* Baltimore Maryland, U.S. Dept. Agriculture Hand Book 18 Soil Survey Manual.

- Naafs, D.F.W., van Bergen P.F., Boogert, S.J., Leeuw, J.W. 2004a. Solvent-extractable lipids in an acid andic forest soil; variations with depth and season. *Soil Biol. and Biochem.* 36:297-308.
- Naafs, D.F.W., Van Bergen, P.F., Jong, M.A., Oonincx, A., De Leeuw, J.N. 2004b. Total lipid extracts from characteristic soil horizons in a podzol profile. *E. J. of Soil Sci.* 55:657-669.
- Narro, F.E. 1994. *Física de Suelos. Con enfoque agrícola.* Ed. Trillas, México, 195 p
- Oades, J.M: 1989. An introduction to organic matter in mineral soils. 89-159 pp. *In: Dixon, J.B., Weed S.B. Mineral in soil environments 2a ed. No 1. SSSA Book Series, Madison, Wisconsin, USA.*
- Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soils structure. *Geoderma* 56:377-400.
- Ourisson G., Albrecht P., Rohmer M. 1984. The microbial origin of fossil fuels. *Sci. Am.* 251:44-51.
- Orlov, D.S. 1985. *Humus acids of soils.* Amerind Publishing Co. P.T. New Delhi. Moscow University Publishers, Moscow. 179-208.
- Page, A.L. (ed.). 1982. *Methods of soil analysis. Part II Agronomy 9, Madison, Wisconsin USA:*
- Philip, R.R., Gilbert, T.D. 1986. The detection and identification of biological markers by computerized gas chromatography-mass spectrometry, 227-248 pp. *In: Johns R.B. (ed.) Biological markers in the sedimentary record. Elsevier. The Netherlands.*
- Pla, L.E. 1986. *Análisis multivariado: método de componentes principales.* Secretaria General de la OEA. Washington, D.C., 91 p.

- Quenea, K., Derenne, S., Largeau, C., Rumpel, C., Mariotti, A. 2004. Variation in lipid relative abundance and composition among different particle size fractions of a forest soil. *Organic Geochemistry* 35:1355-1370.
- Reutergardh, L.B., Parkpian, P., Chaiyaraska, Ch. 1998. Fluid extraction of planar and mono-ortho PCB in selected tropical soils. *Chemosphere* 36:1565-1573.
- Reyes, O.A.L. 1997. Investigación sobre los coloides organominerales y su relación con cultivos florícolas. Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias, UNAM, México, 273 p.
- Rumpel, C., Seraphin, A., Goebel, M—O., Wiesenberg, G., González-Vila, F., Bachmann, J., Schwark, L., Michaelis, W. Mariotti, A., Kögel-Knabner, I. 2004. Alkyl C and hydrophobicity in Band C horizons o fan acid forest soil. *J. Plant. Nutr. Soil Sci.* 167:685-692.
- Schnitzer M. 1978. Humic substances: chemistry and reactions, 42-45 pp. *In*: Schnitzer, M., Khan, S.U. (eds.) *Soil Organic Matter. Developments in Soil Science 8*, Elsevier Scientific Publishing Co. The Netherlands.
- Schnitzer, M. 1990. Characterization of soil humic substances, 77-86 pp. *In* :P. Mac Carthy, C.E. Clapp, R.L. Malcom (eds.) *Humic Substances in Soil and Crop Sciences. Selected readings*. ASA, SSSA, Madison, Wisconsin
- Schnitzer, M. 1991. Soil organic matter-The next 75 years. *Soil Sci.* 151(1):41-58.
- Schnitzer M., Huang, P.M. 1986. Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. *SSSA, No.17, Wisconsin, 77, 79, 83-86, 554, 561 pp.*
- Schutter, M.E., Dick, R.R. 2000. Comparison of fatty acid methyl ester (FAME). *Methods for characterizing microbial communities. Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1659-1668.

- Schwertmann, U. Taylor R. 1977. Iron Oxides, 145-180 pp. In: J.B. Dixon, S.B. Weed. Minerals in soil environments. Soil Science Society of America , Madison, Wisconsin, USA.
- Secretaría de Gobernación y Gobierno de Guerrero. 1988. Los municipios de Guerrero. Colección Enciclopédica de los Municipios de México, 400 p. México.
- Seifert, W.K., Smith, G.W., Whitehead, E.V. 1978. First proof of structure of a C₂₈ pentacyclic triterpane in petroleum. Nature 271, 436.
- Simoneit, B.R.T., Mazurek, M.A. 1982. Organic matter of the troposphere. II. Natural background of biogenic lipid matter in aerosols over the rural western United States. Atmospheric Environment. 16:2139-2159.
- Simonin, P., Jürgens, J., Rohmer, M. 1996. Bacterial triterpenoids of the hopane series from the prochlorophyte *Prochlorothrix hollandica* and their intracellular localization. European J. Biochem. 241:
- Soil Survey Staff. 1999. Keys to Soil Taxonomy. USDA. United States Department of Agricultural and Natural Resource Conservation Science, 422 p.
- Solleiro, R.E. 1997. Oxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. 167-191 pp. In: Adolfo E. Cordero Borboa (ed.) Apuntes del Curso de Cristalografía de suelos. Soc. Mex. de Critalografía. Insituto de Física, UNAM.
- Spack, L., Alvarez, C., Martins, J.M.F., Tarradellas J. 1998. Comparison of supercritical fluid extraction (SFE), Soxhlet and shaking methods for pendimethalin extraction from soil: effect of soil properties and water content. Journal of Contaminant Hydrology 33:171-185.
- SPP. 1975. Carta Topográfica. Hoja Coyuca de Benítez E14-C46 Guerrero. Escala 1:50,000.

- SPP. 1977a. Carta Topográfica. Hoja Cunduacán E15-A89 Tabasco. Escala 1:50,000.
- SPP. 1977b. Carta Topográfica. Hoja El Carrizal E14-C56 Guerrero. Escala 1:50,000.
- Stevenson, F.J. 1966. Lipids in soil. *In: Symposium: Lipids of the Past and Present*. American Oil Chemists Society, 43 (4):203-210.
- Stevenson, F.J. 1994. Humus chemistry. Genesis, composition, reactions. John Wiley & Sons., USA, 166-187 pp.
- Stoot, D.E., Martin, J.P. 1990. Synthesis and degradation of natural and synthetic humic material on soils. *In: MacCarthy C.E.; Chapp R.L. Malcolm; Bloom P.R. (eds.). Humic Substances in Soil and Crop Science*. American Society of Agronomy. Wisconsin, 42, 43, 52, 77, 184, 252-254, 264 pp.
- Tan, K.H. 1986. Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. SSSA. Spec. Pub. No. 17
- Theng, B.K.G. 1974. The Chemistry of clay-organic reactions. Halsted Press Book. John Wiley and Sons. New York, 343 p.
- Thompson, M.L., Ukrainczyk L. Micas, 431-466. *In: J.B. Dixon, D.G. Schulze. Soil mineralogy with environmental applications*. 2a ed. Num. 7 in the Soil Science Society of America Book series 7, SSSA.
- Trendel, J.M., Restle A., Connan J. Albretch P. 1982. Identification of a novel series of tetracyclic terpane hydrocarbons (C24-C27) in sediments and petroleums. *J. Chem. Soc.*, 304-306.
- Tunlid A., White, D.C. 1992. Biochemical analysis of biomass, community structure nutritional status and metabolic activity of microbial communities in soils, 229-260 pp. *In: Stotzky G. Bollag J.M. (eds.) Soil Biochemistry Vol. 7, Marcel Dekker, Inc. N.Y.*

- USDA. 1999. Soil Taxonomy. A Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Natural Resources Conservation Service. 2a ed. Agriculture Handbook, numb.436, 869 p.
- Vallejo, G.E. 1997. Grupo de las Illitas. 149-165. *In*: Adolfo E. Cordero Borboa (ed.) Apuntes del Curso de Cristalografía de Suelos. Soc. Mex. de Critalografía. Insituto de Física, UNAM.
- Van Dorsselaer, A., Albrecht P., Connan J. 1977. Changes in compositions of polycyclic alkane by thermal maturation (Yallourn lignite, Australia), 53-59 pp. *In*: Campos, R., Goñi J.(eds) Advances in Organic Geochemistry 1975. ENADIMSA, Madrid.
- Vázquez-Sánchez, E., Jaimes-Palomera. 1989. Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional* 28:133-190.
- Wada, K., Aomine, S. 1973. Soil development on volcanic materials during the quaternary. *Soil Sci.* 116:170-177.
- Wagner, G.H., Muzorewa, E.I. 1977. Lipids of microbial origin in soil organic matter. 99-104 pp. *In*: Proceedings of Symposium on Soil Organic Matter Studies, Vol. 2, IAEA, Vienna, France.
- Wang, T.S.C., Hwang P.T., Chen C.Y. 1971. Soil lipids under various crops. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35:584-587.
- White, G.N., Dixon, J.B. 2002. Kaolin-serpentine-minerals, 389-414 pp. *In*: J.B. Dixon, D.G. Schulze. Soil mineralogy with environmental applications. 2a ed. Num. 7 in the Soil Science Society of America Book series 7, SSSA.

- Zaragoza, R., Barna, L. Blanchard, J.M. 1998. Experimental design approach for the optimization of supercritical fluid extraction of pyralene and aldrin in soil matrix. *Waste Management* 18:117-123.
- Zelles, L., Bai, Q.Y. 1993. Fractionation of fatty acids derived from soil lipids by solid phase extraction and their quantitative analysis by GC-MS. *Soil Biol. Biochem.* 25:495-507.
- Ziegler, F. 1989. Changes of lipid content and lipid composition in forest humus layers derived from Norway spruce. *Soil Biol. Biochem.* 21:237-243.

APÉNDICE I

DESCRIPCION MORFOLOGICA DEL PERFIL 1.

Localidad: La Pintada Atoyac de Alvarez, Guerrero.

Hoja Topográfica: E14 C46 y E14 C56- INEGI

Altitud: 1300 msnm

Clima: Semicálido húmedo, con abundantes lluvias en verano.

Precipitación: 2423 mm

Temperatura 21.5°C

Vegetación: Bosque mesófilo de montaña

Material Parental: Granodiorita

Pendiente: 20%

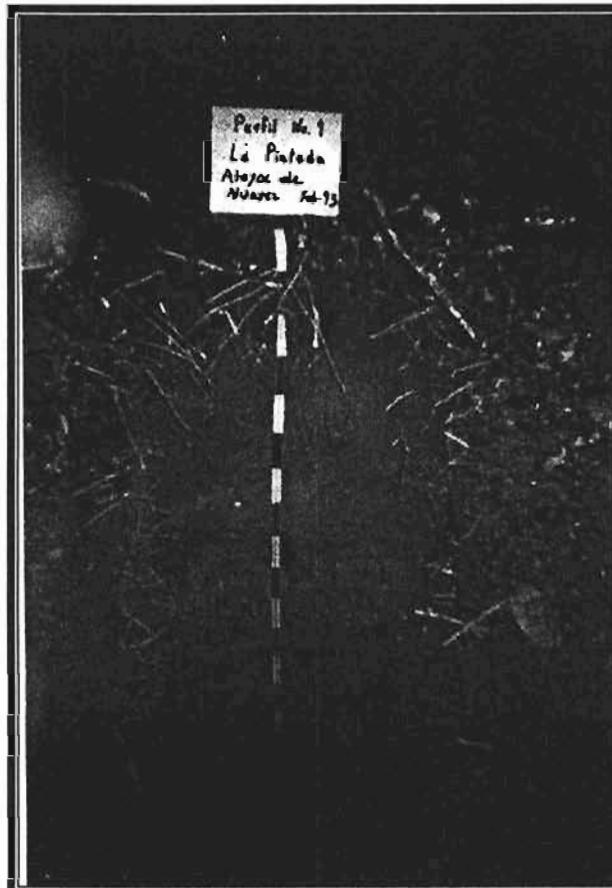
Relieve: Regular

Uso Actual: Cafetal.

Clasificación: Thaptic Hapludand

<u>Horizonte</u> Subhorizonte	Prof. (cm)	Descripción
Ap ₁	0-10	7.5 YR 3/2 pardo oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo) pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada, límite tenue; alofano XXXX; raíces abundantes, gruesas, medias y finas.
	10-20	7.5 YR 4/2 pardo oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo); pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XXXX; raíces abundantes, gruesas, medias y finas.
Ap ₂	20-30	7.5 YR 4/2 pardo oscuro (húmedo); franco; consistencia muy firme (húmedo); ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XXXX, raíces abundantes, gruesas, medias y finas.
	30-40	7.5 YR 4/4 pardo oscuro (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo); ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite marcado; alofano XXX; raíces abundantes, medias y finas.
AB	40-50	7.5 YR 5/4 pardo (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo); pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces abundantes, gruesas, medias y finas.
	50-60	7.5 YR 5/4 pardo (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo); pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces abundantes, gruesas, medias y finas.
	60-70	7.5 YR 5/6 pardo (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces pocas, delgadas y finas.
Bw	70-80	7.5 YR 5/8 pardo (húmedo); franco; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite medio; alofano XX; raíces pocas, delgadas y finas.
	80-90	7.5 YR 6/8 amarillo rojizo (húmedo); franco; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite medio; alofano XX; raíces raras y finas.

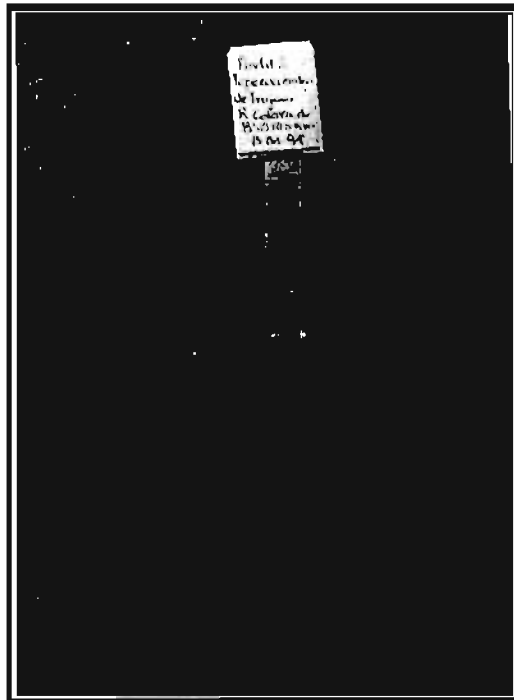
- 90-100
7.5 YR 6/8 amarillo rojizo (húmedo); franco; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces raras y finas.
- 100-110
7.5 YR 7/8 amarillo rojizo (húmedo); franco; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces muy raras y finas.
- 110-120
7.5 YR 4/6 pardo fuerte (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite marcado; alofano XX; raíces muy raras y finas.
- 2A 120-130
7.5 YR 3/4 pardo fuerte (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo); pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano XXXX; raíces muy raras y finas.
- 130-140
7.5 YR 3/4 pardo fuerte (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo); pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XXXX; raíces muy raras y finas.
- 140-150
7.5 YR 3/4 pardo fuerte (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo); pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; alofano XXXX; raíces muy raras y finas.



DESCRIPCION MORFOLOGICA DEL PERFIL 2.

Localidad: Tepecoacuilco de Trujano, Guerrero.
 Hoja Topográfica: E14-A78-INEGI
 Altitud: 850 msnm
 Clima: Cálido subhúmedo, con lluvias en verano.
 Precipitación: 1015 mm
 Temperatura: 26°C
 Vegetación: Bosque bajo caducifolio
 Material Parental: Areniscas-conglomerados.
 Pendiente: 5%
 Relieve: Plano
 Uso Actual: Cultivo de ajonjolí.
 Clasificación: Lithic Ustorthent

<u>Horizonte</u> Subhorizonte	Prof. (cm)	Descripción
Ap	0-10	10 YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro (húmedo); franco; consistencia friable (húmedo), no pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl XX; raíces muy raras y finas.
	10-20	10 YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy friable (húmedo), no pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción fuerte al HCl XXX; raíces muy raras.
C	20-30	10 YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy friable (húmedo), no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; reacción fuerte al HCl XXXX; raíces muy raras.



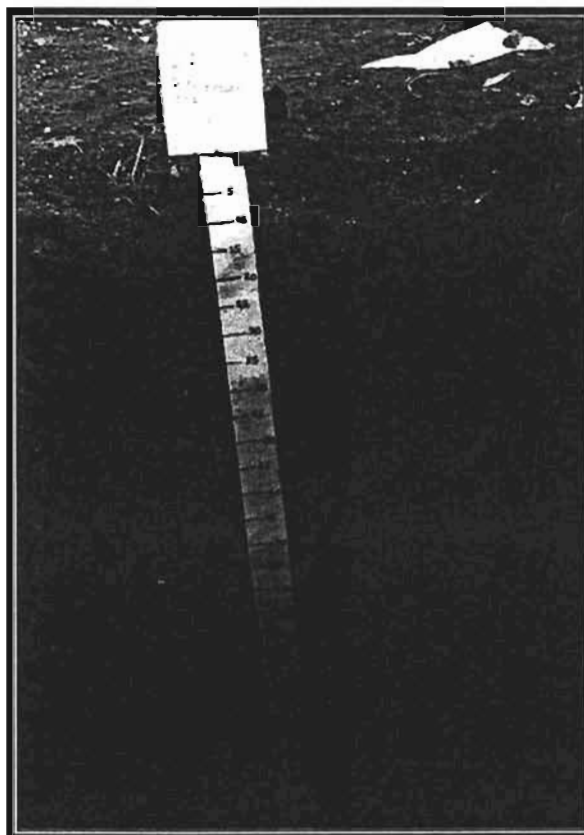
DESCRIPCIÓN MORFOLOGICA DEL PERFIL 3.

Localidad: Tepecoacuilco de Trujano, Guerrero.
 Hoja Topográfica: E14-A78-INEGI
 Altitud: 840 msnm
 Clima: Cálido subhúmedo, con lluvias en verano.
 Precipitación: 1015 mm
 Temperatura: 26°C
 Vegetación: Bosque bajo caducifolio
 Material Parental: Areniscas-conglomerados.
 Pendiente: 8%
 Relieve: Plano
 Uso Actual: Cultivo de cacahuate.
 Clasificación: Typic Ustorthent

<u>Horizonte</u>	Prof.	Descripción
Subhorizonte	(cm)	
Ap ₁	0-10	5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite medio; reacción al HCl X; raíces escasas delgadas y finas.
	10-20	5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo); ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl X; raíces escasas delgadas y finas.
Ap ₂	20-30	5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia firme (húmedo); ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite medio; reacción al HCl: X raíces raras y finas.
	30-40	5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite medio; reacción al HCl XX; raíces muy raras y finas.
AC	40-50	5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl XX; raíces muy raras.
	50-60	5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl XX; raíces muy raras.
	60-70	5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl XX; raíces muy raras.
	70-80	5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl XX; raíces muy raras.
	80-90	5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia muy friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl XX; raíces muy raras.
	90-100	

C

- 100-110 5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia muy friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl XXX; raíces muy raras.
- 110-120 5 YR 3/3 pardo rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo) estructura débilmente desarrollada; límite medio; reacción al HCl XXX; raíces muy raras.
- 120-130 5 YR 4/2 gris rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl XXX; raíces muy raras.
- 130-140 5 YR 4/2 gris rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl XXX; raíces muy raras.
- 140-150 5 YR 4/2 gris rojizo oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; reacción al HCl XXX; raíces muy raras.



DESCRIPCION MORFOLOGICA DEL PERFIL 4.

Localidad: Coyuca de Benítez, Guerrero
 Hoja Topográfica: E14-C-56-INEGI
 Altitud: 100 msnm
 Clima: Semihúmedo con largos períodos de sequía.
 Precipitación: 1102 mm
 Temperatura: 26°C
 Vegetación: Bosque tropical caducifolio
 Material Parental: aluvión.
 Pendiente: 4%
 Relieve: plano
 Uso Actual: Cocotal
 Clasificación: Typic Ustipsamment

<u>Horizonte</u> Subhorizonte	Prof. (cm)	Descripción
Ap ₁	0-10	10 YR 3/3 pardo oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces abundantes gruesas, medias y finas.
	10-20	10 YR 3/3 pardo oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces abundantes gruesas, medias y finas.
Ap ₂	20-30	10 YR 3/3 pardo oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces abundantes gruesas, medias y finas.
	30-40	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces abundantes gruesas, medias y finas.
AC	40-50	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano XX; raíces abundantes gruesas, medias y finas.
	50-60	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano XX; raíces comunes, gruesas, medias y delgadas.
	60-70	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano XX; raíces comunes, gruesas, medias y delgadas.
C	70-80	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arenoso consistencia muy friable (húmedo); o pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano X; raíces comunes, gruesas, medias y finas.
	80-90	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano X; raíces comunes, gruesas, medias y finas.
	90-100	

10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arenoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano XX; raíces comunes, gruesas, medias y finas.

100-110

10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano XX; raíces comunes, gruesas, medias y finas.

110-120

10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano X; raíces comunes, grandes y medias.

120-130

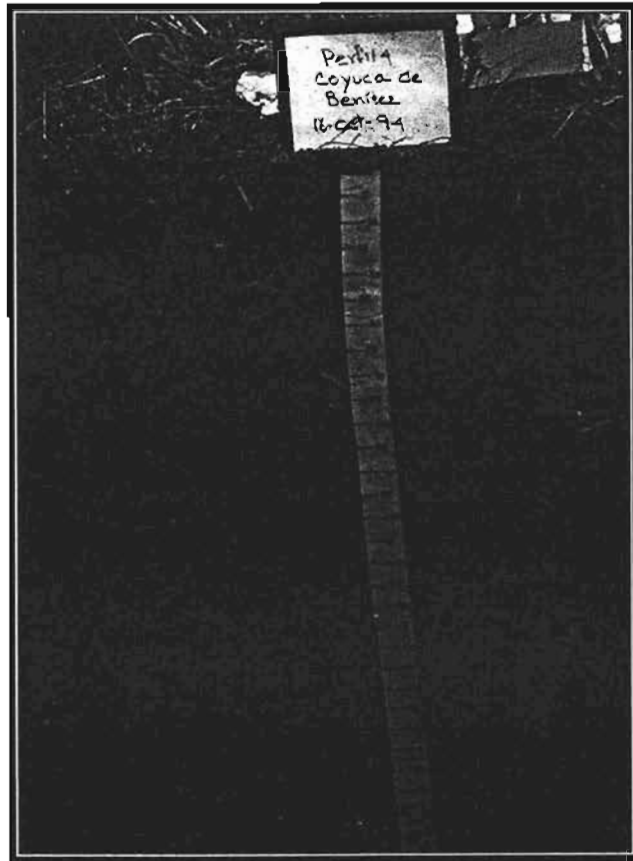
10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano XX; raíces comunes, grandes y medias.

130-140

10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; límite tenue; alofano X; raíces comunes, grandes y medias.

140-150

10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo); no pegajoso y no plástico (muy húmedo); sin estructura; alofano X; raíces comunes, grandes y medias.



DESCRIPCION MORFOLOGICA DEL PERFIL 5.

Localidad: Rancho Oasis, Cunduacán, Tabasco.

Hoja Topográfica: E15-A89-INEGI

Altitud: 30 msnm

Clima: Cálido húmedo, con abundantes lluvias en verano.

Precipitación: 2125 mm

Temperatura: 27°C

Vegetación: Bosque tropical perennifolio.

Material Parental: Lutita-arenisca-conglomerados.

Pendiente: 5%

Relieve: Plano

Uso Actual: Cacaotal.

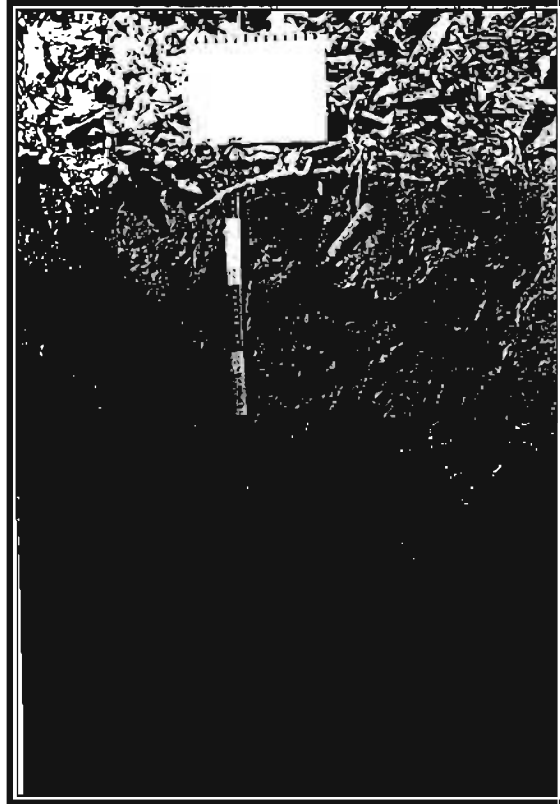
Clasificación: Typic Eutrudept

<u>Horizonte</u>	Prof.	Descripción
Subhorizonte	(cm)	
Ap ₁	0-10	10 YR 3/2 pardo grisáceo (húmedo)muy oscuro; migajón limoso; consistencia muy firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; raíces comunes gruesas, medias y finas.
	10-20	10 YR 3/3 pardo oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo), pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano trazas; raíces comunes, medias y delgadas.
AP ₂	20-30	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo), pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano trazas; raíces pocas, finas y delgadas.
	30-40	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano X; raíces finas muy raras.
AB	40-50	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano X; raíces escasas medias, finas y delgadas.
	50-60	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano trazas; raíces raras, gruesas y delgadas.
	60-70	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano trazas; raíces raras, finas y delgadas.
Bw	70-80	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano X; raíces raras, finas y gruesas.
	80-90	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano X; raíces raras y finas.
	90-100	

10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano X; raíces raras y finas.

100-110

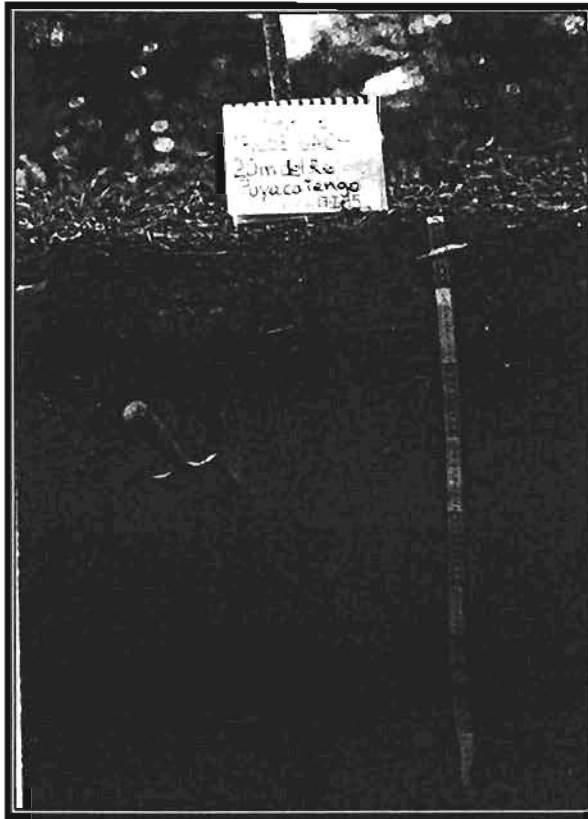
10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia firme (húmedo), pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; alofano XX; raíces raras y finas.



DESCRIPCION MORFOLOGICA DEL PERFIL 6.

Localidad: Puyacatengo, Tabasco.
 Hoja Topográfica: E15-D21-INEGI
 Altitud: 60 msnm
 Clima: Cálido húmedo, con lluvias todo el año.
 Vegetación: Bosque tropical perennifolio
 Precipitación: 3593 mm
 Temperatura: 26°C
 Material Parental: Calizas, con depositos fluviales
 Pendiente: 7%
 Relieve: Plano
 Uso Actual: Pastizal.
 Clasificación: Typic Eutrudept

<u>Horizonte</u>	<u>Prof.</u>	<u>Descripción</u>
Subhorizonte	(cm)	
Ap ₁	0-10	10 YR 3/2 pardo gris muy oscuro (húmedo); migajón arcillo-arenoso; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; sin alofano; sin reacción al HCl; raíces comunes, finas, delgadas y medias.
	10-20	10 YR 3/2 pardo gris muy oscuro (húmedo); franco; consistencia friable (húmedo); ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano trazas; sin reacción al HCl; raíces comunes, finas y delgadas.
Ap ₂	20-30	10YR 3/3 pardo oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia firme (húmedo), pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano X; sin reacción al HCl; raíces escasas, finas y delgadas.
	30-40	10YR 3/4 pardo amarillento (húmedo); franco; consistencia friable (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano X; sin reacción al HCl; raíces raras y finas.
	40-50	10YR 3/4 pardo amarillento (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo), pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano X; sin reacción al HCl; raíces muy raras y delgadas.
B ₁	50-60	10 YR 3/6 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano trazas; sin reacción al HCl; raíces muy raras y delgadas
	60-70	10YR 3/6 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; alofano trazas; sin reacción al HCl; raíces muy raras y delgadas.



DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA DEL PERFIL 7.

Localidad: Puyacatengo, Tabasco.
 Hoja Topográfica: E15-D21-INEGI
 Altitud: 60 msnm
 Clima: Cálido húmedo, con lluvias todo el año.
 Precipitación: 3593 mm
 Temperatura: 26°C
 Vegetación: Bosque tropical perennifolio.
 Material Parental: Calizas, con depósitos fluviales
 Pendiente: 7%
 Relieve: Plano
 Uso Actual: Cacaotal.
 Clasificación: Typic Eutrudept

<u>Horizonte</u> Subhorizonte	Prof. (cm)	Descripción
Ap ₁	0-10	10 YR 3/2 pardo gris muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo) estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; sin alofano; sin reacción al HCl; raíces comunes, gruesas, medias, delgadas y finas.
	10-20	10 YR 3/3 pardo oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo) estructura moderadamente desarrollada límite marcado; sin alofano; sin reacción al HCl; raíces pocas, medias, delgadas y finas.
Ap ₂	20-30	10 YR 3/3 pardo oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano trazas; sin reacción al HCl; raíces raras, finas y delgadas.
	30-40	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano XX; sin reacción al HCl; raíces raras, finas y delgadas.
Bw	40-50	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano X; sin reacción al HCl; raíces muy raras, delgadas.
	50-60	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada, límite tenue; sin alofano; sin reacción al HCl; raíces muy raras y delgadas.
	60-70	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; sin alofano; sin reacción al HCl; sin raíces.
	70-80	10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano trazas; sin raíces.

80-90

10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano XX; sin reacción al HCl; sin raíces.

C

90-100

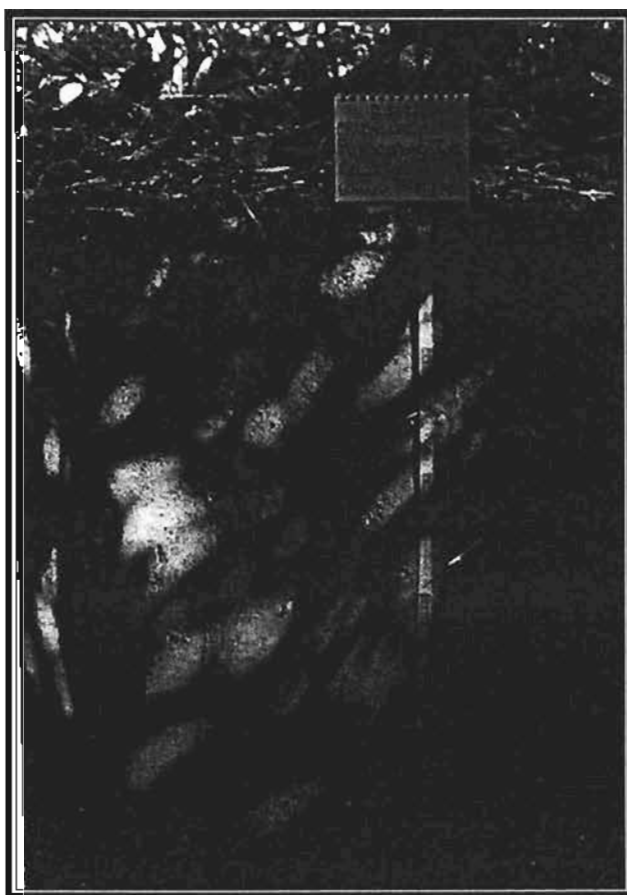
10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arcillo arenoso; consistencia friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; sin reacción al HCl; sin raíces.

100-110

10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arcillo arenoso; consistencia friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; sin reacción al HCl; sin raíces.

110-120

10 YR 3/4 pardo amarillento oscuro (húmedo); migajón arcillo arenoso; consistencia muy friable (húmedo), ligeramente pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; alofano XXX; sin reacción al HCl; sin raíces.



DESCRIPCION MORFOLOGICA DEL PERFIL 8.

Localidad: Tanaquillo, Chilchota, Michoacán.

Hoja Topográfica: E13-B19-INEGI

Altitud: 1800 msnm

Clima: Semicálido subhúmedo, con lluvias en verano.

Precipitación: 1034 mm

Temperatura: 18°C

Vegetación: Bosque de Pino-Encino.

Material Parental: Aluvial

Pendiente: 7%

Relieve: Plano

Uso Actual: Huerto de Aguacate.

Clasificación: Alfíc Haplustand

<u>Horizonte</u>	Prof.	Descripción
Subhorizonte	(cm)	
Ap ₁	0-10	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy firme (húmedo), pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces abundantes, gruesas, medias, delgadas y finas.
	10-20	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón limoso, consistencia muy firme (húmedo), pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces abundantes, gruesas, medias, delgadas y finas.
Ap ₂	20-30	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón limoso; consistencia muy firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces gruesas, medias, finas y delgadas.
	30-40	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); arcilla limoso; consistencia muy firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces gruesas, medias, finas y delgadas.
Bt ₁	40-50	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcillo-limoso; consistencia firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo) estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces abundantes, gruesas, medias, delgadas y finas.
	50-60	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcillo-limoso; consistencia firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo) estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces comunes, gruesas, medias, delgadas y finas; cutanes.
	60-70	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcillo-limoso; consistencia firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo) estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces comunes, medias, delgadas y finas; cutanes.
Bt ₂	70-80	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces comunes, medias, delgadas y finas; cutanes.
	80-90	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada, límite tenue; alofano XXX; raíces comunes, gruesas, medias, delgadas y finas; cutanes.
	90-100	

- 10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces comunes, gruesas, medias, delgadas y finas; cutanes.
- 100-110 10 YR 2.2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces comunes, gruesas, medias, delgadas y finas; cutanes.
- 110-120 10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; raíces pocas, medias, delgadas y finas; cutanes.
- 120-130 10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces pocas, medias, delgadas y finas; cutanes.
- 130-140 10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia muy firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano X; raíces pocas, medias, delgadas y finas; cutanes.
- 140-150 10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia extremadamente firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite moderado; alofano X; raíces pocas, medias, delgadas y finas; cutanes.
- 150-160 10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); arcilla; consistencia extremadamente firme (húmedo), muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; alofano XX; raíces pocas, medias, delgadas y finas; cutanes.
- 160-170 10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); arcilla; consistencia extremadamente firme (húmedo), pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; alofano XX; raíces pocas, medias, delgadas y finas.

Bt₃



DESCRIPCION MORFOLOGICA DEL PERFIL 9.

Localidad: Valle de Tangancicuaro, Michoacán.

Hoja Topográfica: E13-B19-INEGI

Altitud: 1700 msnm

Clima: Semicálido subhúmedo. con lluvias en verano.

Precipitación: 1094 mm

Temperatura: 18°C

Vegetación: Matorral subtropical

Material Parental: Aluvial

Pendiente: 5%

Relieve: Plano

Uso Actual: cultivo de brócoli.

Clasificación: Vertic Thaptic Haplustand

<u>Horizonte</u>	Prof.	Descripción
Subhorizonte	(cm)	
Ap ₁	0-10	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); migajón arcillo-limoso; consistencia muy firme (húmedo); pegajoso y muy plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite tenue; alofano XXX; sin reacción al HCl; raíces abundantes, medias, delgadas y finas.
	10-20	10 YR 2/2 pardo muy oscuro (húmedo); arcillo-limoso; consistencia muy firme (húmedo); pegajoso y muy plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite medio; alofano XXX; sin reacción al HCl; raíces abundantes, medias, delgadas y finas.
Ap ₂	20-30	10 YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro (húmedo); arcillo-limoso consistencia muy firme (húmedo); pegajoso y muy plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada límite tenue; alofano XXXX; sin reacción al HCl; raíces comunes, medias, delgadas y finas.
	30-40	10 YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro (húmedo); migajón arcillo-limoso; consistencia muy firme (húmedo); pegajoso y muy plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite marcado; alofano XXXX; sin reacción al HCl; raíces comunes medias, delgadas y finas.
	40-50	10 YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro (húmedo); arcilla limoso; consistencia muy firme (húmedo); muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite marcado; alofano XXXX; sin reacción al HCl; raíces comunes, delgadas y finas.
2A	50-60	7.5 YR 3/0 negro y 7.5YR 3/2 pardo gris muy oscuro (húmedo); arcilla; consistencia extremadamente firme (seco); muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite marcado; sin reacción al HCl; raíces comunes, delgadas y finas.
	60-70	7.5 YR 3/0 negro (húmedo); arcilla; consistencia extremadamente firme (húmedo); muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite marcado; sin reacción al HCl; raíces raras, medias, delgadas y finas.
	70-80	7.5 YR 2/0 negro (húmedo); arcilla; consistencia extremadamente firme (húmedo); muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite marcado; reacción al HCl X; raíces raras, medias, delgadas y finas.

80-90

7.5 YR 2/0 negro (húmedo); arcilla; consistencia extremadamente firme (húmedo); muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl X; raíces raras, delgadas y finas.

90-100

7.5 YR 2/0 negro (húmedo); arcilla; consistencia extremadamente firme (húmedo); muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite tenue; reacción al HCl X; raíces raras, delgadas y finas.

100-110

7.5 YR 2/0 negro (húmedo); arcilla; consistencia extremadamente firme (húmedo); muy pegajoso y plástico (muy húmedo); estructura fuertemente desarrollada; límite marcado; reacción al HCl XX; raíces raras y finas.

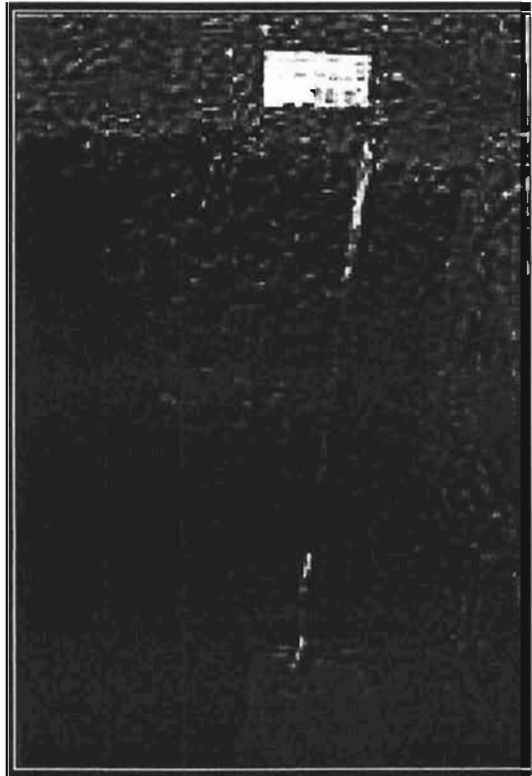
2C

110-120

7.5 YR 4/0 negro (húmedo); migajón arcilloso; consistencia extremadamente firme (húmedo); ligeramente pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura moderadamente desarrollada; límite marcado; reacción al HCl XX; sin raíces.

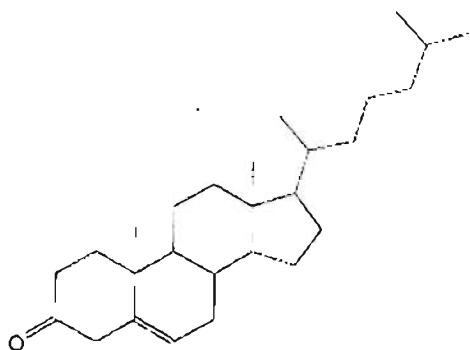
120-130

7.5 YR 5/0 gris y 7.5 YR 6/0 gris claro (húmedo); franco; consistencia firme (húmedo); ligeramente pegajoso y ligeramente plástico (muy húmedo); estructura débilmente desarrollada; reacción al HCl XXX; sin raíces.

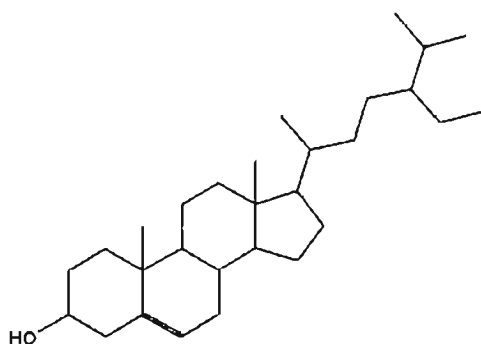


APÉNDICE II

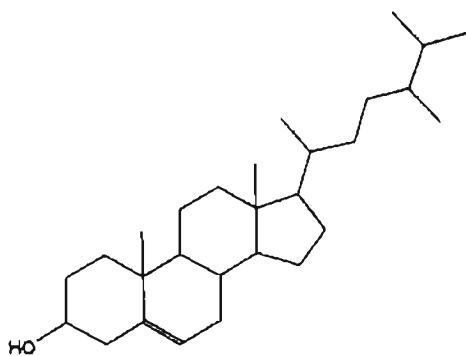
APPENDICE II



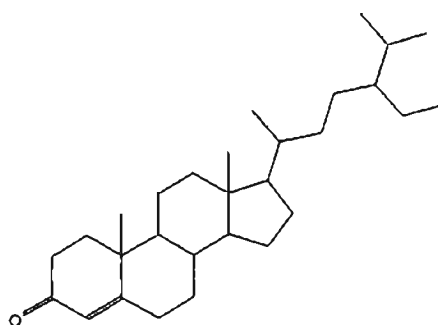
(M)colest-5-en-3-ona



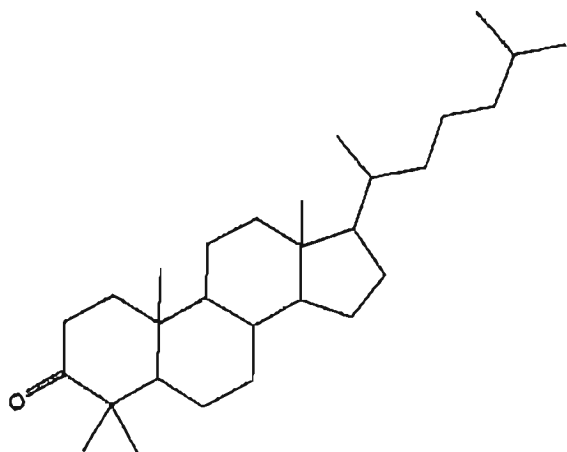
estigmast-5-en-3-ol (3,β, 24S)



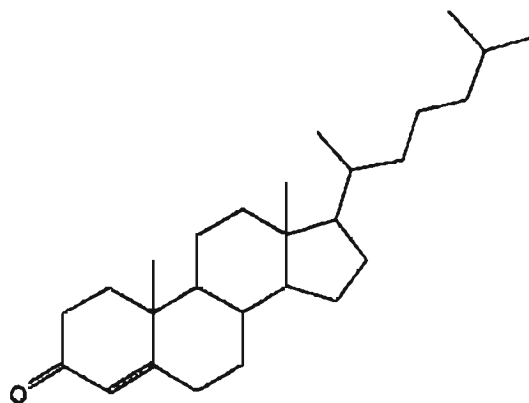
ergost-5-en-3-ol (3. β)



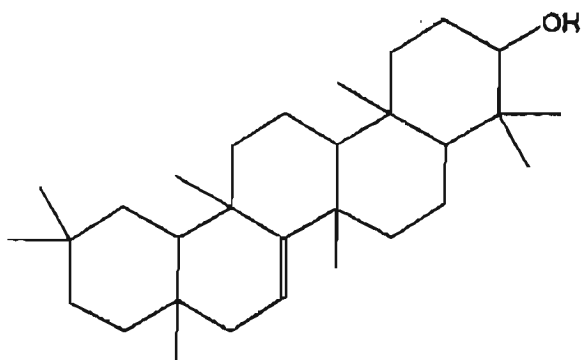
(24R)-4-estigmast-3-ona



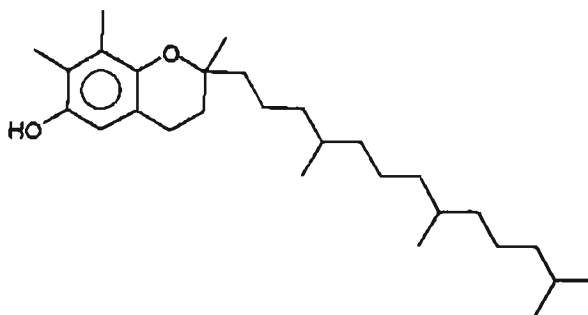
(M)colestan-3-one, 4,4-dimetil-(5.alfa)



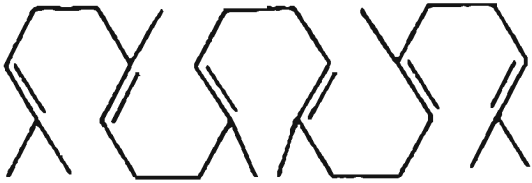
(M)colest-4en-3-one



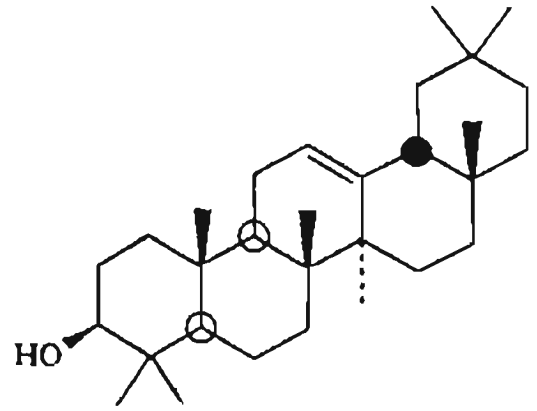
(M) Taraxerol



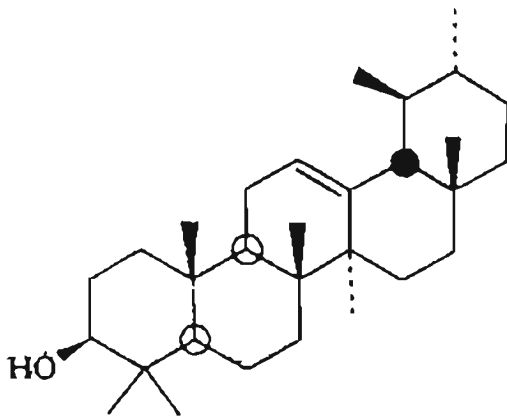
gama-Tocoferol



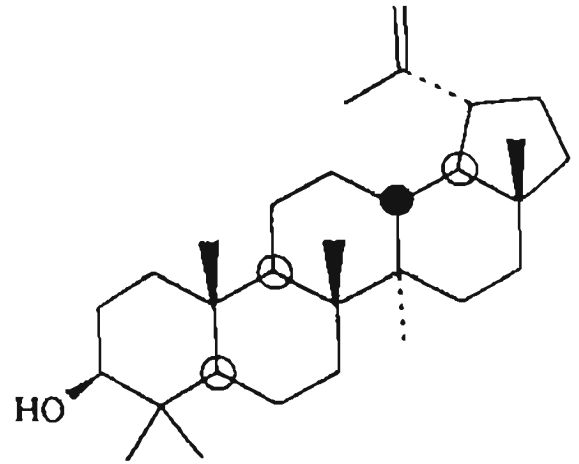
escualeno



beta-amirina



alfa-amirina



Lupeol

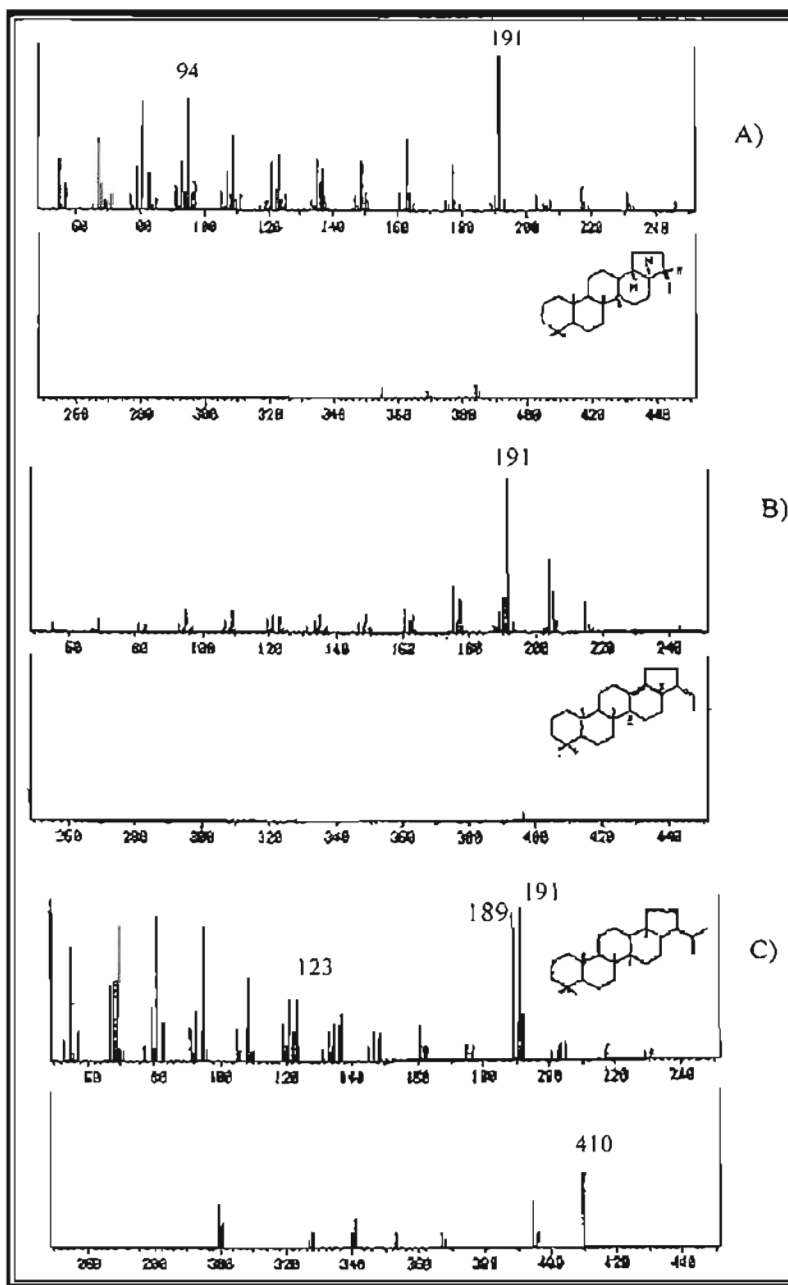


Figura 46. Espectro de masas del A) 17 α (H),18 α (H),21 β (H)-28,30-Bisnorhopano; B) 30-Norneohop-13(18)-ano; C) Hop-22(29)-ano (En: Philip and Gilbert, 1986).

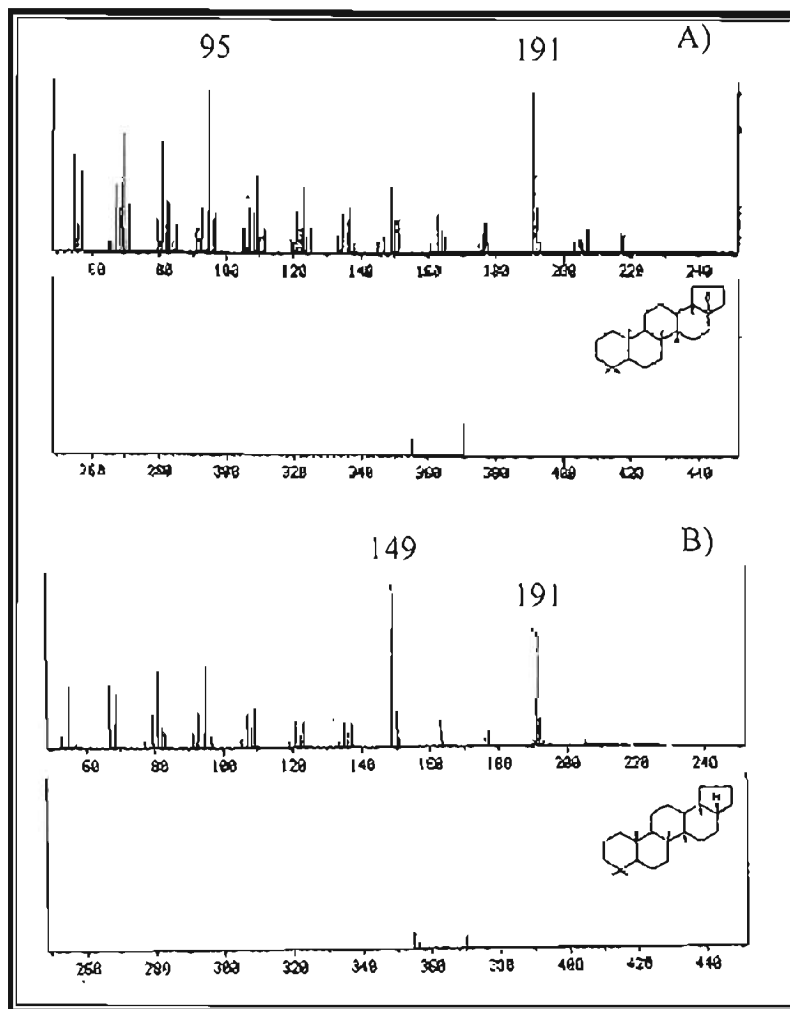


Figura 47. Espectros de masas del C₂₇-hopanos, a) 17 α (H)-22,29,30-trisnorhopano y b) 17 β (H)-22,29,30-trisnorhopano (En: Philip and Gilbert, 1986).

Tabla 38. Valor nutritivo de algunos cultivos de importancia agrícola en México (De Chávez *et al.*, 1992).

CULTIVOS	PROTEINAS TOTALES g	GRASAS TOTALES GRASAS	ACIDOS GRASOS g			MINERALES mg			
			SATURADOS	MONOINSA- TURADOS OLEICO	POLIINSA- TURADOS LINOLEICO	CALCIO	MAGNESIO	POTASIO	SODIO
Maíz	11.7	4.7	0.5	1.3	2.5	8	147	284	1
Ajonjolí	22.4	50.9	7.1	19.7	21.6	727	181	725	60
Cacao con cáscara	15.0	47.0	27.0	19.0	1.0	134	292	830	4
Cacao sin cáscara	16.0	49.5	27.0	19.0	1.0	85	292	830	4
Cacahuete	23.7	49.7	6.8	15.7	14.0	54	176	658	5
Aguacate	1.8	18.4	3.0	8.0	2.0	39	45	604	4
Brócoli	3.6	0.3	0.1	0.0	0.0	48	24	325	27
Coco	3.8	33.2	30.0	3.9	1.0	24	46	256	23

APÉNDICE III

Tabla 39. Coeficientes de determinación en las variables ambientales y parámetros del suelo, para los primeros tres ejes en el modelo de ACC, para el grupo de los alcanos.

	Eje 1 % variabilidad explicada	Eje 2 % variabilidad explicada	Eje 3 % variabilidad explicada
Temperatura	20.7936	23.8144	0.0009
Precipitación	0.0841	1.1025	2.3409
Pendiente	0.81	0.1024	0.0144
Carbono	19.6249	7.4529	0.5929
Lípidos	7.3441	0.2704	2.9241
Nitrógeno	44.89	5.9049	2.1025
pH	1.2769	2.5921	2.9929
Arcilla	3.2041	0.7569	9.7344
Densidad Aparente	17.2225	16.9744	0.4356
Acidos Húmicos	36.2404	10.6276	1.8496

Tabla 40. Coeficientes de determinación en las variables ambientales y parámetros del suelo, para los primeros tres ejes en el modelo de ACC, para el grupo de los ácidos grasos.

	Eje 1 % variabilidad explicada	Eje 2 % variabilidad explicada	Eje 3 % variabilidad explicada
Temperatura	2.28	3.53	19.98
Precipitación	0.59	2.28	9.00
Pendiente	49.14	0.74	34.11
Carbono	3.42	4.71	57.46
Lípidos	45.29	2.34	37.70
Nitrógeno	0.06	5.71	39.44
pH	4.67	2.04	28.20
Arcilla	0.72	8.35	41.34
Densidad Aparente	5.76	2.22	41.60
Acidos Húmicos	2.02	5.15	32.04

CCAresul_alcanos

***** Canonical Correspondence Analysis *****
 PC-ORD, Version 4.33
 1 Mar 2005, 11:34
 CCA Alcanos

DATA MATRICES

 Main matrix:
 11 sitios (rows)
 21 especies (columns)

 Second matrix:
 11 sitios (rows)
 10 variable (columns)

 Finished reading data.

OPTIONS SELECTED

Axis scores centered and standardized to unit variance
 Axes scaled to optimize representation of rows: sitios
 (Scores for sitios are weighted mean scores for especies)
 Scores for graphing sitios are linear combinations of variable
 No Monte Carlo tests

RAW CORRELATIONS AMONG VARIABLES IN SECOND MATRIX

	temp	precip	pend	carb	lipid	nitrog	pH	arci
DA	0.841	0.239	0.050	-0.895	-0.443	-0.916	-0.226	-0.522
AH	-0.771	-0.180	-0.041	0.880	0.478	0.983	0.333	0.477
temp	1.000	0.530	0.088	-0.702	-0.339	-0.773	-0.309	-0.324
precip	0.530	1.000	0.364	-0.056	0.020	-0.202	-0.729	0.332
pend	0.088	0.364	1.000	0.366	0.782	0.039	-0.515	0.393
carb	-0.702	-0.056	0.366	1.000	0.781	0.900	0.057	0.640
lipid	-0.339	0.020	0.782	0.781	1.000	0.549	-0.062	0.539
nitrog	-0.773	-0.202	0.039	0.900	0.549	1.000	0.300	0.505
pH	-0.309	-0.729	-0.515	0.057	-0.062	0.300	1.000	-0.245
arci	-0.324	0.332	0.393	0.640	0.539	0.505	-0.245	1.000
DA	0.841	0.239	0.050	-0.895	-0.443	-0.916	-0.226	-0.522
AH	-0.771	-0.180	-0.041	0.880	0.478	0.983	0.333	0.477

CCAresul_alcanos

WEIGHTED CORRELATIONS AMONG VARIABLES IN SECOND MATRIX
(weighted by row totals in main matrix)

	temp	precip	pend	carb	lipid	nitrog	pH	arci	DA
AH									
temp	1.000	0.510	0.085	-0.717	-0.340	-0.788	-0.302	-0.337	
0.852	-0.795								
precip	0.510	1.000	0.368	-0.039	0.023	-0.187	-0.738	0.334	
0.216	-0.183								
pend	0.085	0.368	1.000	0.371	0.782	0.042	-0.523	0.420	
0.033	-0.035								
carb	-0.717	-0.039	0.371	1.000	0.775	0.900	0.029	0.667	
-0.899	0.883								
lipid	-0.340	0.023	0.782	0.775	1.000	0.545	-0.073	0.570	
-0.443	0.478								
nitrog	-0.788	-0.187	0.042	0.900	0.545	1.000	0.279	0.531	
-0.917	0.986								
pH	-0.302	-0.738	-0.523	0.029	-0.073	0.279	1.000	-0.239	
-0.192	0.314								
arci	-0.337	0.334	0.420	0.667	0.570	0.531	-0.239	1.000	
-0.539	0.499								
DA	0.852	0.216	0.033	-0.899	-0.443	-0.917	-0.192	-0.539	
1.000	-0.938								
AH	-0.795	-0.183	-0.035	0.883	0.478	0.986	0.314	0.499	
-0.938	1.000								

ITERATION REPORT

Calculating axis 1

Residual = 0.48E+04 at iteration 1
 Residual = 0.92E-01 at iteration 2
 Residual = 0.88E-02 at iteration 3
 Residual = 0.83E-03 at iteration 4
 Residual = 0.83E-04 at iteration 5
 Residual = 0.89E-05 at iteration 6
 Residual = 0.10E-05 at iteration 7
 Residual = 0.12E-06 at iteration 8
 Residual = 0.14E-07 at iteration 9
 Residual = 0.18E-08 at iteration 10
 Residual = 0.27E-13 at iteration 16
 Solution reached tolerance of 0.100000E-12 after 16 iterations.

Calculating axis 2

Residual = 0.20E+01 at iteration 1
 Residual = 0.24E-02 at iteration 2
 Residual = 0.15E-02 at iteration 3
 Residual = 0.94E-03 at iteration 4
 Residual = 0.58E-03 at iteration 5
 Residual = 0.35E-03 at iteration 6

CCAresul_alcanos

Residual = 0.21E-03 at iteration 7
 Residual = 0.13E-03 at iteration 8
 Residual = 0.79E-04 at iteration 9
 Residual = 0.48E-04 at iteration 10
 Residual = 0.33E-06 at iteration 20
 Residual = 0.22E-08 at iteration 30
 Residual = 0.15E-10 at iteration 40
 Residual = 0.32E-12 at iteration 50
 Residual = 0.57E-13 at iteration 53
 Solution reached tolerance of 0.100000E-12 after 53 iterations.

Calculating axis 3

Residual = 0.20E+01 at iteration 1
 Residual = 0.34E-09 at iteration 2
 Residual = 0.60E-10 at iteration 3
 Residual = 0.13E-10 at iteration 4
 Residual = 0.39E-11 at iteration 5
 Residual = 0.12E-11 at iteration 6
 Residual = 0.76E-12 at iteration 7
 Residual = 0.17E-12 at iteration 8
 Residual = 0.90E-12 at iteration 9
 Residual = 0.23E-12 at iteration 10
 Residual = 0.16E-11 at iteration 20
 Residual = 0.10E-11 at iteration 30
 Residual = 0.84E-12 at iteration 40
 Residual = 0.86E-13 at iteration 50
 Solution reached tolerance of 0.100000E-12 after 50 iterations.

AXIS SUMMARY STATISTICS

Number of canonical axes: 3
 Total variance ("inertia") in the species data: 0.2623

	Axis 1	Axis 2	Axis 3
Eigenvalue	0.129	0.046	0.036
Variance in species data			
% of variance explained	49.1	17.7	13.8
Cumulative % explained	49.1	66.8	80.6
Pearson Correlation, Spp-Envt*	1.000	1.000	1.000
Kendall (Rank) Corr., Spp-Envt	1.000	1.000	1.000

* Correlation between sample scores for an axis derived from the species data and the sample scores that are linear combinations of the environmental variables. Set to 0.000 if axis is not canonical.

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Regression of sitios in especies space on variable

Variable	Canonical coefficients						S.Dev
	Standardized			Original Units			
	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 1	Axis 2	Axis 3	
1 temp	-0.153	0.064	0.302	-0.033	0.014	0.065	0.463E+01
2 precip	0.376	-0.486	-0.272	0.000	0.000	0.000	0.105E+04
3 pend	0.484	0.154	-0.084	0.111	0.035	-0.019	0.436E+01
4 carb	-1.907	1.054	-1.874	-0.078	0.043	-0.077	0.243E+02
5 lipid	0.296	-0.666	0.856	0.235	-0.527	0.678	0.126E+01
6 nitrog	1.687	-1.287	-0.439	0.311	-0.237	-0.081	0.543E+01

	CCAresul_alcanos						
7 pH	0.156	-0.313	-0.359	0.174	-0.350	-0.402	0.894E+00
8 arci	-0.205	0.134	0.188	-0.002	0.001	0.002	0.926E+02
9 DA	-1.064	1.017	-0.764	-4.089	3.909	-2.936	0.260E+00
10 AH	-0.885	1.680	1.194	-0.031	0.059	0.042	0.283E+02

Scores that are derived from the scores of especies (WA Scores)
FINAL SCORES and raw data totals (weights) for 11 sitios

	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Raw Data Totals
1 S1	0.224341	-0.056096	0.073361	586.3100
2 S2	-0.265651	-0.201119	-0.072374	721.1899
3 S3	0.091170	-0.104257	0.067639	580.8040
4 S4	-0.239569	-0.189024	0.206447	645.8800
5 S5	-0.285531	0.033399	-0.039335	465.3200
6 S6	0.155983	-0.231885	-0.283093	820.0101
7 S7	-0.230175	0.366364	0.345586	412.1700
8 S8	-0.182763	0.456959	-0.322771	639.1600
9 S9	-0.184354	0.053771	0.156464	505.3600
10 S10	-0.233492	-0.015750	0.035529	548.0000
11 S11	0.956287	0.117326	0.083450	627.0000

Scores that are linear combinations of variable (LC Scores)
FINAL SCORES and raw data totals (weights) for 11 sitios

	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Raw Data Totals
1 S1	0.224341	-0.056096	0.073361	586.3100
2 S2	-0.265651	-0.201119	-0.072374	721.1899
3 S3	0.091170	-0.104257	0.067639	580.8040
4 S4	-0.239569	-0.189024	0.206447	645.8800
5 S5	-0.285531	0.033399	-0.039335	465.3200
6 S6	0.155983	-0.231885	-0.283093	820.0101
7 S7	-0.230175	0.366364	0.345586	412.1700
8 S8	-0.182763	0.456959	-0.322771	639.1600
9 S9	-0.184354	0.053771	0.156463	505.3600
10 S10	-0.233492	-0.015750	0.035529	548.0000
11 S11	0.956288	0.117327	0.083450	627.0000

FINAL SCORES and raw data totals (weights) for 21 especies

	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Raw Data Totals
1 C15	5.429550	1.109998	2.178780	22.7600
2 C16	6.391146	1.793561	2.241403	26.0000
3 C17	3.783364	-0.954443	-0.898604	66.7300
4 C18	3.876081	-0.753627	-0.545632	56.4500
5 C19	4.025486	-0.516369	-0.043669	58.0100
6 C20	3.694010	-0.934903	-0.688835	49.3600
7 C21	3.806793	-0.778904	-0.409237	48.7720
8 C22	1.082385	3.532228	-3.887199	94.4520
9 C23	-0.615463	0.175639	0.361250	349.2000

CCaresul_alcanos				
10 C24	-0.716637	1.109509	-1.778956	280.0700
11 C25	-0.390357	-0.310290	-0.581777	435.4500
12 C26	-0.246823	-0.540028	-1.658215	273.8500
13 C27	-0.227627	0.322871	-1.176051	542.3600
14 C28	-0.204913	-0.604713	-0.414840	301.2000
15 C29	-0.027592	0.534863	0.330067	985.8700
16 C30	-0.348389	-0.337147	0.454967	347.8800
17 C31	-0.305520	0.623243	0.995076	959.3200
18 C32	-0.163567	-1.984754	0.244608	263.2300
19 C33	-0.278676	-2.245769	-0.301897	495.6700
20 C34	-0.093667	0.686182	1.288440	406.3800
21 C35	0.070365	0.167158	0.762496	488.1900

CORRELATIONS AND BIPLLOT SCORES for 10 variable

Variable	Correlations*			Biplot Scores		
	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 1	Axis 2	Axis 3
1 temp	-0.456	-0.488	-0.003	-0.164	-0.105	-0.001
2 precip	-0.029	-0.105	-0.153	-0.010	-0.023	-0.029
3 pend	0.090	-0.032	-0.012	0.032	-0.007	-0.002
4 carb	0.443	0.273	0.077	0.159	0.059	0.015
5 lipid	0.271	-0.052	0.171	0.097	-0.011	0.033
6 nitrog	0.670	0.243	0.145	0.241	0.052	0.028
7 pH	0.113	-0.161	0.173	0.041	-0.035	0.033
8 arci	0.179	0.087	0.312	0.064	0.019	0.059
9 DA	-0.415	-0.412	-0.066	-0.149	-0.089	-0.013
10 AH	0.602	0.326	0.136	0.216	0.070	0.026

* Correlations are "intrasets correlations" of ter Braak (1986)

INTER-SET CORRELATIONS for 10 variable

Variable	Correlations		
	Axis 1	Axis 2	Axis 3
1 temp	-0.456	-0.488	-0.003
2 precip	-0.029	-0.105	-0.153
3 pend	0.090	-0.032	-0.012
4 carb	0.443	0.273	0.077
5 lipid	0.271	-0.052	0.171
6 nitrog	0.670	0.243	0.145
7 pH	0.113	-0.161	0.173
8 arci	0.179	0.087	0.312
9 DA	-0.415	-0.412	-0.066
10 AH	0.602	0.326	0.136

Note: Obtain joint plots or biplots by selecting GRAPH, then
requesting "Joint plots" from the GRAPH menu.

***** operation completed *****

CCAresul_grasos

***** Canonical Correspondence Analysis *****
 PC-ORD, Version 4.33
 1 Mar 2005, 12:15
 CCA Grasos

DATA MATRICES

 Main matrix:

11 sitios (rows)
 21 especies (columns)

Second matrix:

11 sitios (rows)
 10 variable (columns)

Finished reading data.

OPTIONS SELECTED

Axis scores centered and standardized to unit variance
 Axes scaled to optimize representation of rows: sitios
 (Scores for sitios are weighted mean scores for especies)
 Scores for graphing sitios are linear combinations of variable
 No Monte Carlo tests

RAW CORRELATIONS AMONG VARIABLES IN SECOND MATRIX

	temp	precip	pend	carb	lipid	nitrog	pH	arci
DA								
temp	1.000	0.530	0.088	-0.702	-0.339	-0.773	-0.309	-0.324
AH	0.841	-0.771						
precip	0.239	1.000	0.364	-0.056	0.020	-0.202	-0.729	0.332
pend	0.050	0.088	1.000	0.366	0.782	0.039	-0.515	0.393
carb	-0.895	-0.056	0.366	1.000	0.781	0.900	0.057	0.640
lipid	-0.443	0.020	0.782	0.781	1.000	0.549	-0.062	0.539
nitrog	-0.916	-0.202	0.039	0.900	0.549	1.000	0.300	0.505
pH	-0.226	-0.729	-0.515	0.057	-0.062	0.300	1.000	-0.245
arci	-0.522	0.332	0.393	0.640	0.539	0.505	-0.245	1.000
DA	1.000	0.239	0.050	-0.895	-0.443	-0.916	-0.226	-0.522
AH	-0.935	-0.771	-0.041	0.880	0.478	0.983	0.333	0.477

CCAresul_grasos

WEIGHTED CORRELATIONS AMONG VARIABLES IN SECOND MATRIX
(weighted by row totals in main matrix)

	temp	precip	pend	carb	lipid	nitrog	pH	arci	DA
AH									
temp	1.000	0.458	0.025	-0.691	-0.336	-0.779	-0.223	-0.375	
0.840	-0.784								
precip	0.458	1.000	0.392	0.066	0.118	-0.099	-0.751	0.380	
0.125	-0.094								
pend	0.025	0.392	1.000	0.482	0.843	0.161	-0.573	0.483	
-0.051	0.057								
carb	-0.691	0.066	0.482	1.000	0.800	0.905	-0.121	0.726	
-0.884	0.874								
lipid	-0.336	0.118	0.843	0.800	1.000	0.572	-0.223	0.611	
-0.443	0.481								
nitrog	-0.779	-0.099	0.161	0.905	0.572	1.000	0.140	0.593	
-0.921	0.982								
pH	-0.223	-0.751	-0.573	-0.121	-0.223	0.140	1.000	-0.345	
-0.084	0.193								
arci	-0.375	0.380	0.483	0.726	0.611	0.593	-0.345	1.000	
-0.600	0.554								
DA	0.840	0.125	-0.051	-0.884	-0.443	-0.921	-0.084	-0.600	1.000
1.000	-0.943								
AH	-0.784	-0.094	0.057	0.874	0.481	0.982	0.193	0.554	
-0.943	1.000								

ITERATION REPORT

Calculating axis 1

Residual = 0.53E+04 at iteration 1
 Residual = 0.32E+00 at iteration 2
 Residual = 0.67E+00 at iteration 3
 Residual = 0.20E-01 at iteration 4
 Residual = 0.22E-03 at iteration 5
 Residual = 0.25E-05 at iteration 6
 Residual = 0.30E-07 at iteration 7
 Residual = 0.35E-09 at iteration 8
 Residual = 0.43E-11 at iteration 9
 Residual = 0.45E-12 at iteration 10
 Residual = 0.33E-13 at iteration 13
 Solution reached tolerance of 0.100000E-12 after 13 iterations.

Calculating axis 2

Residual = 0.22E+01 at iteration 1
 Residual = 0.54E+00 at iteration 2
 Residual = 0.20E-01 at iteration 3
 Residual = 0.70E-02 at iteration 4
 Residual = 0.37E-02 at iteration 5
 Residual = 0.20E-02 at iteration 6

CCAresul_grasos

Residual = 0.11E-02 at iteration 7
 Residual = 0.60E-03 at iteration 8
 Residual = 0.32E-03 at iteration 9
 Residual = 0.17E-03 at iteration 10
 Residual = 0.37E-06 at iteration 20
 Residual = 0.80E-09 at iteration 30
 Residual = 0.89E-12 at iteration 40
 Residual = 0.78E-12 at iteration 50
 Residual = 0.72E-13 at iteration 55
 Solution reached tolerance of 0.100000E-12 after 55 iterations.

 Calculating axis 3

Residual = 0.20E+01 at iteration 1
 Residual = 0.16E-03 at iteration 2
 Residual = 0.10E-03 at iteration 3
 Residual = 0.65E-04 at iteration 4
 Residual = 0.42E-04 at iteration 5
 Residual = 0.27E-04 at iteration 6
 Residual = 0.17E-04 at iteration 7
 Residual = 0.11E-04 at iteration 8
 Residual = 0.73E-05 at iteration 9
 Residual = 0.47E-05 at iteration 10
 Residual = 0.58E-07 at iteration 20
 Residual = 0.71E-09 at iteration 30
 Residual = 0.86E-11 at iteration 40
 Residual = 0.49E-12 at iteration 50
 Residual = 0.58E-13 at iteration 52
 Solution reached tolerance of 0.100000E-12 after 52 iterations.

 AXIS SUMMARY STATISTICS

Number of canonical axes: 3
 Total variance ("inertia") in the species data: 0.6716

	Axis 1	Axis 2	Axis 3
Eigenvalue	0.505	0.055	0.041
Variance in species data			
% of variance explained	75.1	8.2	6.1
Cumulative % explained	75.1	83.4	89.4
Pearson Correlation, Spp-Envt*	1.000	1.000	1.000
Kendall (Rank) Corr., Spp-Envt	1.000	1.000	1.000

* Correlation between sample scores for an axis derived from the species data and the sample scores that are linear combinations of the environmental variables. Set to 0.000 if axis is not canonical.

MULTIPLE REGRESSION RESULTS:

Regression of sitios in especies space on variable

 Canonical Coefficients

variable	Standardized			Original Units			S.Dev
	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 1	Axis 2	Axis 3	
1 temp	0.300	0.368	0.120	0.068	0.083	0.027	0.444E+01
2 precip	0.405	-0.473	0.069	0.000	0.000	0.000	0.101E+04
3 pend	1.075	0.237	0.297	0.214	0.047	0.059	0.503E+01
4 carb	-4.147	3.104	-1.587	-0.159	0.119	-0.061	0.261E+02
5 lipid	0.279	-1.748	0.498	0.192	-1.208	0.344	0.145E+01

	CCAresul_grasos						
6 nitrog	0.482	-0.264	0.365	0.091	-0.050	0.069	0.528E+01
7 pH	0.340	0.108	-0.095	0.370	0.117	-0.104	0.918E+00
8 arci	-0.074	0.252	-0.071	-0.001	0.003	-0.001	0.960E+02
9 DA	-3.766	1.894	-1.232	-14.155	7.119	-4.630	0.266E+00
10 AH	-0.247	0.297	-0.118	-0.009	0.011	-0.004	0.276E+02

Scores that are derived from the scores of especies (WA Scores)
FINAL SCORES and raw data totals (weights) for 11 sitios

	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Raw Data Totals
1 S1	-1.395840	0.066640	0.320457	605.2700
2 S2	-0.895567	-0.062337	-0.403472	659.5000
3 S3	0.411028	0.050066	-0.095661	462.0200
4 S4	0.318045	-0.348431	0.069492	298.5700
5 S5	0.483078	0.672836	-0.038217	380.0000
6 S6	0.409246	-0.117331	0.028403	395.0600
7 S7	0.432929	-0.032234	0.009953	347.0000
8 S8	0.452095	-0.232222	0.074453	365.0000
9 S9	0.488744	-0.193922	0.059582	354.0000
10 S10	0.387811	0.060001	-0.014276	418.0000
11 S11	0.464122	0.035526	0.159057	334.0000

Scores that are linear combinations of variable (LC Scores)
FINAL SCORES and raw data totals (weights) for 11 sitios

	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Raw Data Totals
1 S1	-1.395840	0.066640	0.320457	605.2700
2 S2	-0.895567	-0.062337	-0.403472	659.5000
3 S3	0.411028	0.050066	-0.095661	462.0200
4 S4	0.318045	-0.348431	0.069491	298.5700
5 S5	0.483078	0.672836	-0.038218	380.0000
6 S6	0.409246	-0.117331	0.028402	395.0600
7 S7	0.432929	-0.032234	0.009953	347.0000
8 S8	0.452095	-0.232222	0.074453	365.0000
9 S9	0.488744	-0.193922	0.059581	354.0000
10 S10	0.387811	0.060001	-0.014276	418.0000
11 S11	0.464122	0.035526	0.159057	334.0000

FINAL SCORES and raw data totals (weights) for 21 especies

	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Raw Data Totals
1 C14	0.569485	1.914885	0.419015	364.3200
2 C15	0.520244	0.740605	0.316446	176.4600
3 C16	0.510603	0.144012	-0.124493	912.6600
4 C17	0.669519	1.955113	-0.653273	278.7400
5 C18	0.608771	-1.402128	0.684696	769.8000
6 C19	0.695772	-1.123080	0.181102	233.4000
7 C20	0.348142	-0.237163	-0.819780	457.6400
8 C21	0.376574	0.039982	0.646633	222.1900

	CCAresul_grasos				
9 C22	-0.568248	0.079250	-0.376422		441.6800
10 C23	-0.863799	-1.156295	-1.822700		107.4500
11 C24	-2.033388	-0.479124	-0.751294		184.1100
12 C25	-2.192087	-0.145839	-2.429537		63.8800
13 C26	-2.433062	0.421007	1.894939		118.9900
14 C27	-2.192590	-0.144655	-2.420510		51.8400
15 C28	-2.399994	0.343221	1.301513		86.6000
16 C29	-2.340834	0.204058	0.239834		27.9600
17 C30	-2.456224	0.475492	2.310610		41.5600
18 C31	-2.162190	-0.216165	-2.966055		31.1800
19 C32	-2.348816	0.222836	0.383088		26.1200
20 C33	-2.766357	1.205016	7.876167		5.0400
21 C34	-2.766357	1.205016	7.876167		16.8000

CORRELATIONS AND BIPLLOT SCORES for 10 variable

Variable	Correlations*			Biplot Scores		
	Axis 1	Axis 2	Axis 3	Axis 1	Axis 2	Axis 3
1 temp	-0.151	0.188	-0.447	-0.107	0.044	-0.090
2 precip	-0.077	0.151	0.300	-0.055	0.035	0.061
3 pend	-0.701	0.086	0.584	-0.498	0.020	0.118
4 carb	-0.185	0.217	0.758	-0.132	0.051	0.153
5 lipid	-0.673	0.153	0.614	-0.478	0.036	0.124
6 nitrog	0.024	0.239	0.618	0.017	0.056	0.125
7 pH	0.216	0.143	-0.531	0.154	0.034	-0.107
8 arci	-0.085	0.289	0.643	-0.061	0.068	0.130
9 DA	-0.240	-0.149	-0.645	-0.170	-0.035	-0.130
10 AH	0.142	0.227	0.566	0.101	0.053	0.114

* Correlations are "intrasets correlations" of ter Braak (1986)

INTER-SET CORRELATIONS for 10 variable

Variable	Correlations		
	Axis 1	Axis 2	Axis 3
1 temp	-0.151	0.188	-0.447
2 precip	-0.077	0.151	0.300
3 pend	-0.701	0.086	0.584
4 carb	-0.185	0.217	0.758
5 lipid	-0.673	0.153	0.614
6 nitrog	0.024	0.239	0.618
7 pH	0.216	0.143	-0.531
8 arci	-0.085	0.289	0.643
9 DA	-0.240	-0.149	-0.645
10 AH	0.142	0.227	0.566

Note: Obtain joint plots or biplots by selecting GRAPH, then
requesting "Joint plots" from the GRAPH menu.

***** Operation completed *****