

00381

27  
31  
MAY 1997



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**



FACULTAD DE CIENCIAS

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



**INVESTIGACION SOBRE LOS COLOIDES  
ORGANOMINERALES EN SUELOS DE XOCHIMILCO  
Y SU RELACION CON CULTIVOS FLORICOLAS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE

**DOCTORA EN CIENCIAS (BIOLOGIA)**

**P R E S E N T A :**

**AMADA LAURA REYES ORTIGOZA**



MEXICO, D. F.

1997

**TESIS CON  
FOLIA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

*A la memoria de mi tutor, Dr.honoris causa y Profesor Emérito Nicolás Aguilera Herrera\*, porque aunque el tiempo no fue suficiente para ver escrita esta tesis siempre permaneció inquieto por mejorar mi formación académica.*

*Gracias por ser como fue, se que desde donde esté me marcará el sendero hacia la luz de la investigación.*

*Mi corazón y mi mente siempre guardaran sus consejos, conocimientos, sencillez y amor por la ciencia.*

*Hasta siempre querido Maestro.*

*Con especial cariño y amor a mis padres Teresa Ortigoza Hernández y Daniel Reyes Budhart, gracias por encaminar cada uno de mis pasos con paciencia. Al expresar su apoyo, ayuda y comprensión las palabras parecen pocas y simples, sin embargo su participacion diaria es mucha, pues cada uno de sus detalles implica una entrega total.*

*Mil gracias por ser los mejores padres.*

*Con amor a Lambert Francisco, porque sin ti la armonía de mi vida no sería completa, se  
que siempre estarás a mi lado y contaré con tu apoyo.*

*A mis sobrinas Laura Alejandra y Diana Sofía porque a pesar de ser tan pequeñas su presencia da el aliento para vivir con mayor alegría.*

***Con cariño:***

***A mis hermanas Karina y Miriam por prestarme atención y dedicarme mucho de su tiempo.***

***A mis hermanos Sibylle, Cecilia, Daniel y Enrique.***

## **AGRADECIMIENTOS**

*A la Dra. Norma Eugenia García Calderón por su apoyo, sugerencias e importante participación para el buen desarrollo de la tesis. Así como por haber mostrado gran interés y dedicación a mi investigación al asignarseme como Tutor y miembro de mi comité tutorial.*

*A los Miembros del Jurado, Doctores:*

*María Cristina Pérez Amador*

*Lenom J. Cajuste*

*Roberto Nuñez Escobar*

*Alfredo Echegaray Alemán*

*Francisco Velasco de Pedro*

*Gonzálo Almendros Martín*

*Por su detallada revisión, por sus sugerencias, comentarios y valiosos aportes.*

*Un agradecimiento especial a los Doctores: Francisco Velasco de Pedro, Antonio Guerra Delgado, Alfredo Echegaray Alemán, Gonzálo Almendros Martín por participar activamente en la investigación desarrollada y en mi formación académica.*



*A Mary por ser una gran amiga admirable e invaluable como ser humano.*

*A Chelito por su ayuda y amistad.*

*A Eduardo Vasco Quinzán un especial y sincero agradecimiento.*

*A la Química Aida García, a la Dra. Ma. Cristina Pérez Amador, a la M en C Jaqueline Cañetas Ortega, al Físico Roberto Hernández, Al Ing., Victor Muñoz Coria, Al Dr. Jaime Ortiz, a la M en C Elvia Díaz Valdéz, a la Dra. Maria Elena Villafuerte, al Dr. José Reyes, al Dr Victor Volke Haller y al Sr. Pedro Mexia por su apoyo técnico y ayuda desinteresada.*

*A la Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN, al Instituto de Física de la UNAM, al Instituto de Materiales de la UNAM, al Centro de Ciencias medioambientales del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de Madrid, España.*

*A la dirección general de asuntos para el personal académico (DGAPA) por la beca otorgada indispensable como apoyo económico para el óptimo desarrollo de esta tesis.*

***A Dios por darme la oportunidad de tener todo y seguir proporcionándome cada día algo nuevo.***

## INDICE

1. Introducción.	1
2. Resumen.	3
3. Antecedentes.	7
4. Revisión Bibliográfica.	10
4.1. ¿ Que es un organomineral?.	10
4.2. Métodos para el estudio de organominerales del suelo.	15
4.3. Estructura química de los minerales del suelo.	18
4.4. Estructura química de los materiales húmicos y orgánicos.	23
4.5. Minerales del suelo como catalizadores en la formación de sustancias húmicas.	27
4.6. La biodegradación y la acción protectora de los minerales del suelo.	29
4.7. Interacción de enzimas con arcillas y material orgánico.	32
5. Objetivos.	34
6. Metodología.	35
6.1. Muestreo de suelos.	35
6.2. Análisis físicos y químicos.	37
6.3. Fraccionamiento del suelo.	38
6.4. Electroforesis.	40
6.5. Espectroscopía de infrarrojo.	40
6.6. Difracción de rayos X.	41
6.7. Microscopía electrónica de barrido y microscopía electrónica de transmisión.	41
6.8. Espectroscopía de emisión de plasma.	42
6.9. Evaluación del contenido de polisacáridos totales.	43
6.10. Análisis de la capa blanca.	43
6.11. Bioensayo.	44
7. Discusión de resultados.	48
7.1. Características de campo.	48
7.2. Suelo de San Gregorio Atlapulco.	52
7.2.1. Características físicas y químicas.	52
7.2.2. Evolución de las fracciones orgánicas.	72
7.2.2.1. Fraccionamiento de la materia orgánica.	72
7.2.2.2. Caracterización de ácidos húmicos por electroforesis.	78
7.2.2.3. Espectroscopía de infrarroja de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral.	80
7.2.2.4. Concentración de carbono en ácidos fúlvicos aromáticos y alifáticos.	83
7.2.2.5. Concentración de metales asociada a las fracciones de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos.	84
7.2.3. Polisacáridos totales del suelo.	88
7.2.4. Número de diatomeas en el suelo.	90

7.2.5. Patrones de distribución del carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas.	91
7.2.6. Capacidad de intercambio catiónico e iones intercambiables en las diferentes fracciones granulométricas.	99
7.2.7. Contenido en metales totales de las fracciones granulométricas.	110
7.2.8. Concentración de polisacáridos en las fracciones de arcillas y complejos arcilla humus.	112
7.2.9. Análisis de los espectros de difracción de rayos X e infrarrojo de arcillas y complejos arcilla humus.	115
7.3. Suelo de San Luis Tlaxiualtemalco.	134
7.3.1. Características físicas y químicas.	134
7.3.2. Evolución de las fracciones orgánicas.	141
7.3.2.1. Fraccionamiento de la materia orgánica.	141
7.3.2.2. Caracterización de ácidos húmicos por electroforesis.	146
7.3.2.3. Espectroscopía infrarroja de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral.	147
7.3.2.4. Concentración de carbono en ácidos fúlvicos aromáticos y alifáticos.	149
7.3.2.5. Concentración de metales asociada a las fracciones de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos.	150
7.3.3. Polisacáridos totales del suelo.	152
7.3.4. Número de diatomeas en el suelo.	154
7.3.5. Patrones de distribución del carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas.	158
7.3.6. Capacidad de intercambio catiónico total e iones intercambiables en las fracciones granulométricas.	171
7.3.7. Contenido en metales totales de las fracciones granulométricas.	172
7.3.8. Concentración de polisacáridos en las fracciones de arcillas y complejos arcilla humus.	174
7.3.9. Análisis de los espectros de difracción de rayos X e infrarrojo de arcillas y complejos arcilla humus.	177
7.4. Suelo de Tláhuac.	182
7.4.1. Características físicas y químicas.	182
7.4.2. Evolución de las fracciones orgánicas.	190
7.4.2.1. Fraccionamiento de la materia orgánica.	190
7.4.2.2. Caracterización de ácidos húmicos por electroforesis.	195
7.4.2.3. Espectroscopía infrarroja de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral.	196
7.4.2.4. Concentración en carbono de ácidos fúlvicos aromáticos y alifáticos.	211
7.4.2.5. Concentración de metales asociada a las fracciones de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos.	200
7.4.3. Polisacáridos totales del suelo.	202

7.4.4. Número de diatomeas en el suelo.	203
7.4.5. Patrones de distribución de carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas.	205
7.4.6. Capacidad de intercambio catiónico total e iones intercambiables de las fracciones minerales.	210
7.4.7. Contenido en metales totales de las fracciones granulométricas.	219
7.4.8. Concentración de polisacáridos en las fracciones de arcillas y complejos arcilla humus.	220
7.4.9. Análisis de los espectros de difracción de rayos X e infrarrojo de arcillas y complejos arcilla humus.	223
7.5. Bioensayo.	229
7.5.1. Número de semillas que germinaron	229
7.5.2. Longitud del tallo	229
7.5.3. Longitud de la raíz	232
7.5.4. Peso fresco	234
7.5.5. Porcentaje de supervivencia	236
7.5.6. Número de hojas por planta	239
8. Conclusiones	252
9. Literatura citada	256

## INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Figura No. 1. Carga neta de un óxido hipotético.	22
Figura No.2. Estructura hipotética de ácidos húmicos .	25
Figura No.3. Estructura química de ácidos húmicos.	26
Figura No.4. Estructura de ácidos fúlvicos.	26
Figura No.5. Mapa de ubicación del área estudiada..	36
Figura No.6. Diseño experimental del bioensayo.	47
Figura No.7. Mica.	127
Figura No. 8. Feldespatos..	127
Figura No.9. Opalo A..	128
Figura No. 10. Cristobalita..	128
Figura No. 11 y 12. Montmorillonita..	129
Figura No. 13. Agregado de montmorillonita..	130
Figura No.14. Hojuela de montmorillonita.	130
Figura No. 15 y 16. Arcilla caolinita.	131
Figura No.17. Haloisita globular .	132
Figura No. 18. Haloisita Tubular.	132
Figura No. 19. Haloisita.	133
Figura No. 20. Patrón de difracción de rayos X de haloisita.	133
Figura. No. 21. <i>Navicula sp.</i>	155
Figura No. 22. <i>Epithemia sp.</i>	155
Figura No. 23. <i>Cymbella sp.</i>	156
Figura No. 24. <i>Gomphonema sp.</i>	156
Figura No. 25. <i>Cocconeis placentula sp.</i>	157
Figura No. 26. Comparación de tratamientos en el desarrollo de <i>A. majus</i>	251
<b>SUELO DE SAN GREGORIO ATLAPULCO</b>	
	70
Tabla No. 1. Características físicas y químicas del suelo de San Gregorio Atlapulco.	
Tabla No. 2. Contenidos de carbono, nitrógeno fósforo, iones intercambiables del suelo de San Gregorio Atlapulco.	71
Tabla No.3. Características de las pastas de saturación del suelo de San Gregorio Atlapulco.	71
Tabla No.4. Concentración de metales totales en el suelo de San Gregorio Atlapulco	71
Tabla No. 5. Fraccionamiento de la materia orgánica en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	77
Tabla No. 6. Porcentajes de carbono en ácidos fúlvicos aromáticos y alifáticos del suelo de San Gregorio Atlapulco.	84
Tabla No.7. Concentración de metales en las fracciones orgánicas del suelo de San Gregorio Atlapulco.	88
Tabla No.8. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	90
Tabla No.9. Análisis mediante microsonda de los polisacáridos totales del suelo de San Gregorio Atlapulco.	90

Tabla No.10. Número de diatomeas en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	91
Tabla No.11. Contenidos de carbono y nitrógeno de las fracciones granulométricas del suelo de San Gregorio Atlapulco.	96
Tabla No.12. Contenidos de carbono y nitrógeno con respecto a su distribución granulométrica en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	97
Tabla No.13. Relaciones entre los iones intercambiables de las diferentes fracciones granulométricas en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	109
Tabla No.14. Contenido de metales totales de las fracciones arcilla y complejo arcilla humus en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	112
Tabla No.15. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en las fracciones de arcilla y complejos arcilla humus del suelo de San Gregorio Atlapulco.	114
Tabla No.16. Análisis mediante microsonda del liofilizado de polisacáridos totales en las fracciones de arcilla y complejos arcilla humus del suelo de San Gregorio Atlapulco.	115

#### SUELO DE SAN LUIS TLAXIALTEMALCO

Tabla No. 17. Características físicas y químicas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	139
Tabla No. 18. Contenidos de carbono, nitrógeno fósforo, iones intercambiables del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	140
Tabla No.19. Características de las pastas de saturación del suelo de San Luis Tlaxialtemalco	140
Tabla No.20. Concentración de metales totales en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	140
Tabla No. 21. Fraccionamiento de la materia orgánica en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	145
Tabla No. 22. Porcentajes de carbono en ácidos fúlvicos aromáticos y alifáticos del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	149
Tabla No.23. Concentración de metales en las fracciones orgánicas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	152
Tabla No.24. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	153
Tabla No.25. Análisis mediante microsonda de los polisacáridos totales del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	153
Tabla No.26. Número de diatomeas en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	154
Tabla No.27. Contenidos de carbono y nitrógeno de las fracciones granulométricas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	162
Tabla No.28. Contenidos de carbono y nitrógeno con respecto a su distribución granulométrica en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	162
Tabla No.29. Relaciones entre los iones intercambiables de las diferentes fracciones granulométricas en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	171
Tabla No.30. Contenido de metales totales de las fracciones arcilla y complejo arcilla humus en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	173
Tabla No.31. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en las fracciones de	176

arcilla y complejos arcilla humus del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	
<b>Tabla No.32. Análisis mediante microsonda del liofilizado de polisacáridos totales en las fracciones de arcilla y complejos arcilla humus del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.</b>	<b>176</b>

## **SUELO DE TLAHUAC**

<b>Tabla No. 33. Características físicas y químicas del suelo de Tláhuac.</b>	<b>188</b>
<b>Tabla No. 34. Contenidos de carbono, nitrógeno fósforo, iones intercambiables del suelo de Tláhuac.</b>	<b>189</b>
<b>Tabla No.35. Características de las pastas de saturación del suelo de Tláhuac.</b>	<b>190</b>
<b>Tabla No.36. Concentración de metales totales en el suelo de Tláhuac</b>	<b>190</b>
<b>Tabla No. 37. Fraccionamiento de la materia orgánica en el suelo de Tláhuac.</b>	<b>194</b>
<b>Tabla No. 38. Porcentajes de carbono en ácidos fúlvicos aromáticos y alifáticos del suelo de Tláhuac.</b>	<b>200</b>
<b>Tabla No.39. Concentración de metales en las fracciones orgánicas del suelo de Tláhuac.</b>	<b>201</b>
<b>Tabla No.40. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en el suelo de Tláhuac.</b>	<b>203</b>
<b>Tabla No.41. Análisis mediante microsonda de los polisacáridos totales del suelo de Tláhuac.</b>	<b>203</b>
<b>Tabla No.42. Número de diatomeas en el suelo de Tláhuac.</b>	<b>204</b>
<b>Tabla No.43. Contenidos de carbono y nitrógeno de las fracciones granulométricas del suelo de Tláhuac.</b>	<b>207</b>
<b>Tabla No.44. Contenidos de carbono y nitrógeno con respecto a su distribución granulométrica en el suelo de Tláhuac.</b>	<b>207</b>
<b>Tabla No.45. Relaciones entre los iones intercambiables de las diferentes fracciones granulométricas en el suelo de Tláhuac.</b>	
<b>Tabla No.46. Contenido de metales totales de las fracciones arcilla y complejo arcilla humus en el suelo de Tláhuac.</b>	
<b>Tabla No.47. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en las fracciones de arcilla y complejos arcilla humus del suelo de Tláhuac.</b>	
<b>Tabla No.48. Análisis mediante microsonda del liofilizado de polisacáridos totales en las fracciones de arcilla y complejos arcilla humus del suelo de Tláhuac.</b>	

## **BIOENSAYO.**

<b>Tabla No. 49. Número de semillas germinadas.</b>	<b>246</b>
<b>Tabla No. 50. Longitud del tallo.</b>	<b>247</b>
<b>Tabla No. 51. Longitud de raíz.</b>	<b>248</b>
<b>Tabla No. 52. Peso fresco.</b>	<b>249</b>
<b>Tabla No. 53. Porcentaje de supervivencia.</b>	<b>250</b>
<b>Tabla No.54. Número de hojas.</b>	<b>251</b>



## SUELO DE SAN GREGORIO

Gráfica No. 1. Distribución granulométrica del suelo de San Gregorio Atlapulco.	70
Gráfica No.2.Curvas densitométricas de los electroforegramas de ácidos húmicos del suelo de San Gregorio Atlapulco.	80
Gráfica No.3. Espectros de infrarrojo de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral del suelo de San Gregorio Atlapulco.	82
Gráfica No.4. Porcentajes de carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas complejadas con material húmico en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	98
Gráfica No.5.Porcentajes de fósforo asimilable en complejos arcilla humus y arcillas del suelo de San Gregorio Atlapulco.	96
Gráfica No.6. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa superficial en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	106
Gráfica No.7. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa blanca en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	107
Gráfica No.8. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa profunda en el suelo de San Gregorio Atlapulco.	108
Gráfica No.9. Espectros de infrarrojo de complejos arcilla humus del suelo de San Gregorio Atlapulco.	123
Gráfica No.10. Espectros de infrarrojo de arcillas del suelo de San Gregorio Atlapulco.	124
Gráfica No. 11. Espectros de difracción de rayos X en la arcilla del suelo de San Gregorio Atlapulco.	125
Gráfica No.12. Espectros de difracción de rayos X en la arcilla del suelo de San Gregorio Atlapulco.	126
Gráfica No. 13. Distribución granulométrica del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	139

## SUELO SAN LUIS TLAXIALTEMALCO

Gráfica No.14.Curvas densitométricas de los electroforegramas de ácidos húmicos del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	146
Gráfica No.15. Espectros de infrarrojo de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	148
Gráfica No.16. Porcentajes de carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas complejadas con material húmico en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	161
Gráfica No.17 .Porcentajes de fósforo asimilable en complejos arcilla humus y arcillas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	160
Gráfica No.18. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa superficial en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	168
Gráfica No.19. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa blanca en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	169
Gráfica No.20. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa profunda en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	170
Gráfica No.21. Espectros de infrarrojo de complejos arcilla humus del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	179

Gráfica No.22. Espectros de infrarrojo de arcillas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	180
Gráfica No. 23. Espectros de difracción de rayos X en la arcilla del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.	181

#### SUELO DE TLAHUAC

Gráfica No. 24. Distribución granulométrica del suelo de Tláhuac.	189
Gráfica No.25.Curvas densitométricas de los electroforegramas de ácidos húmicos del suelo de Tláhuac..	196
Gráfica No.26. Espectros de infrarrojo de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral del suelo de Tláhuac..	198
Gráfica No.27. Porcentajes de carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas complejadas con material húmico en el suelo de Tláhuac..	209
Gráfica No.28..Porcentajes de fósforo asimilable en complejos arcilla humus y arcillas del suelo de Tláhuac..	208
Gráfica No.29. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa superficial en el suelo de Tláhuac.	215
Gráfica No.30. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa blanca en el suelo de Tláhuac.	216
Gráfica No.31. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa profunda en el suelo de Tláhuac..	217
Gráfica No.32. Espectros de infrarrojo de complejos arcilla humus del suelo de Tláhuac..	226
Gráfica No.33. Espectros de infrarrojo de arcillas del suelo de Tláhuac..	227
Gráfica No. 34. Espectros de difracción de rayos X en la arcilla del suelo deTláhuac..	228

## **1.INTRODUCCION.**

**Al observar un paisaje agrícola nosotros encontramos diversas situaciones, cultivos que se desarrollan en óptimas condiciones o con escaso crecimiento, drenajes deficientes con acumulación excesiva de agua, suelos con buena agregación, determinadas estructuras o grandes producciones agrícolas. Lo que observamos no es más que el resultado de las interacciones de las partículas que constituyen el suelo, ¿pero hasta que punto conocemos lo que sucede a nivel molecular y que desemboca en lo qué están viendo nuestros ojos?, sabemos que la actividad microbiana tiene gran influencia, que el material parental, la topografía, el clima, la vegetación y el tiempo transcurrido también participan en este proceso, sin embargo la complejidad y variabilidad de estas interacciones dificulta el conocimiento de los mecanismos de las reacciones existentes. La formación de complejos organominerales presentes en el suelo, participa de esta complejidad y se refleja en las propiedades macroscópicas del suelo.**

**El conocimiento de la interacción de los coloides organominerales puede resolver problemas importantes y actuales como la contaminación en acuíferos y suelos, la comprensión de diversas reacciones químicas existentes en los procesos de tratamiento de lodos residuales en las estaciones depuradoras y en las industrias obligadas a manejar sus desechos (Sawhney, 1989).**

**La formación de complejos organominerales en el suelo inhibe la toxicidad de metales pesados y de compuestos fenólicos provenientes de herbicidas, debido a que tanto los minerales arcillosos como la materia orgánica adsorben anillos aromáticos y diversos compuestos tóxicos por lo que se ha planteado la posibilidad de manejarlos como un sustrato en la detoxificación ambiental. (Zielke et al., 1989).**

La presencia de moléculas orgánicas como los aminoácidos en meteoritos sugiere que las arcillas pueden haber catalizado varias reacciones prebiológicas a través de la formación de ácidos de Lewis, debido a que su estructura actúa como aceptora de electrones (Cairns-Smith y Hartman, 1986; Boyd y Mortland, 1990).

Estudiar los organominerales de suelos implica tratar de conocer la dinámica generada a nivel estructural detallado y obtener bases reales para optimizar su aprovechamiento, por tanto la presente investigación en suelos chinamperos de Xochimilco, tiene la finalidad de establecer las características de las fracciones orgánicas y minerales, así como la actividad generada cuando interactúan ambas bajo los factores edafogenéticos del área que concurren en un lago, así como la actividad volcánica y antrópica, además de la presencia de sales contaminantes, avanzar y profundizar en dichos aspectos permitirá su rehabilitación y a su vez aumentará la productividad de estos suelos.

Promover medidas de conservación es necesario ya que es un centro ecológico, turístico, comercial, antropológico y agrícola, siendo ésta última actividad la que ha venido disminuyendo, por lo que se requieren estudios que mejoren y rehabiliten el área, lo que influirá sobre el desarrollo económico basado en la productividad florícola y horticola .

## 2. RESUMEN.

Se caracterizaron los coloides organominerales de suelos del área chinampera Xochimilco-Tláhuac con diferente pH (ácido, neutro y alcalino), donde se seleccionaron tres capas, la superficial (CS) (10-20 cm), la capa de color blanco (CB) de profundidad variable constituida en gran parte de diatomeas y polimorfos de sílice, así como la profunda (CP) cercana al manto freático (180-200 cm). Las muestras de suelo se sometieron al ultrasonido, para obtener sus fracciones granulométricas (arcillas, limos, arenas) y a la extracción con la solución de Kononova para obtener, ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas asociadas, analizándolas por métodos generales y aplicando diversas metodologías: espectroscopía de infrarrojo (IR), difracción de rayos X (DRX), espectrofotometría de emisión de plasma, microscopía electrónica de barrido (MEB), microscopía electrónica de transmisión (MET), electroforesis y microsonda. A su vez, se evaluó el crecimiento inicial del cultivo florícola *Antirrhinum majus* "Perrito" en sustratos constituidos por las fracciones de arcillas provenientes de los suelos ácido y alcalino asociadas o libres de materia orgánica a 2 dosis 30 y 80 mg kg<sup>-1</sup>.

La presencia de organominerales se hizo evidente al analizar el contenido de carbono y nitrógeno de las diferentes fracciones granulométricas, así como al definir las características y los porcentajes de materia orgánica de hasta 31%. En todas las calicatas el humus por sus características analíticas se ubicó dentro de los límites del mull a excepción de la CB neutra. La estabilidad en las CS y CB conlleva además la siguiente serie gradativa: ácida > alcalina > neutra. Los espectros de IR y los valores de movilidad electroforética mostraron una mayor polimerización en AH de las CS y CP, con respecto a las CB. Los porcentajes de carbono asociados a los AF aromáticos (0.05-0.81) fueron

menores que los de los alifáticos (1.58-7.63). En la concentración de metales totales, solo el cadmio se consideró con problemas de toxicidad, los AH mostraron mayores concentraciones de metales que los AF, comprobándose el siguiente orden de concentración  $Al > Fe > Zn > Cu > Ni > Cr > Co \cong Cd$ . En todas las fracciones analizadas, éstos fueron más abundantes en la calicata ácida. En el suelo y arcillas los contenidos de polisacáridos totales oscilaron de 0.52 a 1.20 g 100 g<sup>-1</sup>, con un 90% de carácter lábil. En arcillas ácidas se encontraron los máximos porcentajes de fósforo (0.04 g 100 g<sup>-1</sup>) y las mayores CICT de 115 cmol (+) kg<sup>-1</sup>. Las máximas retenciones de carbono y nitrógeno se dieron en la fracción de arcilla (40g 100 g<sup>-1</sup>) y en la materia orgánica libre (MOL) (45g 100 g<sup>-1</sup>). Los contenidos de iones intercambiables en la arcilla ácida conservaron el orden siguiente  $Mg > Ca > K > Na$ , mientras que en la neutra y alcalina el Na<sup>+</sup> fue más abundante que el K<sup>+</sup>. La retención del hierro (70%) fue mayor en la fracción orgánica, mientras que la de aluminio (90%) se asoció a la arcilla. Los análisis de difracción de rayos X y espectroscopía de IR evidenciaron la presencia de feldespatos, micas, illita, montmorillonita, caolinita, haloisita, serpentinas tipo bertierina, lizardita y antigorita, magnetita, maghemita, amorfos y polimorfos de sílice como el ópalo A de origen biogénico.

El bioensayo con *Antirrhinum majus* mostró mayor desarrollo en plantas cultivadas en el tratamiento No.16 (arcilla extraída de la capa superficial del suelo ácido a dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup>), donde todas las respuestas evaluadas fueron estadísticamente significativas. La presencia de materia orgánica a veces fue favorable; la dosis alta (80 mg kg<sup>-1</sup>) produjeron mejores resultados en los tratamientos ácidos mientras que en los alcalinos fue la dosis baja (30 mg kg<sup>-1</sup>). Las plantas en pH ácido se desarrollaron mejor que en el alcalino, debido a la óptima concentración de macro y micronutrientes que promovió mejor solubilidad.

## 2.ABSTRACT

Soil organomineral complexes with different pH's from the "chinampa areas Xochimilco-Tlahuac" were characterized. Three layers were selected, the surface layer (SL) (10-20 cm), the white color layer (WL) at different depth,- this layer is constituted mainly by diatom algas and silica polymorphs-, and the deep layer (DL) closed of the phreatic level (180-200 cm). These soil samples were put under ultrasonic treatment in order to separate the organomineral complexes as granulometric fractions (clays, silts, sands). Humic substances were extracted with Kononova solution for obtaining humic acids (HA), fulvic acids (FA) and associated humins. All samples were analysed by general methods and by infrared spectroscopy (IR), X-ray diffraction (XRD), atomic plasma spectrochemical analysis, transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM), microsonde and electrophoresis. Also it was evaluated the initial growth of the flower *Antirrhinum majus* in agrolite with clay fractions that were removed of the acid and alkaline soils associated or free of organic matter on 30 and 80 mg kg<sup>-1</sup> dosis.

The presence of organomineral complexes has been evident by analysing the carbon and nitrogen contents in the differents granulometric fractions when defining the characteristics and also when the percentages of organic matter arose until 31.04%. The ecological classification of the humus type in all the samples correspond to humus mull type, excepting the neutral WL. The stability of the SL and WL has kept the following relation: acid > alkaline > neutral. The IR and the immobile/mobile index (I/M) showed the highest polymerization in HA of the SL and DL than WL. The percentages associated with carbon at the phenolic FA (0.05-0.81%) were less than the alliphatic (1.58-7.63). Total metals did not arise toxic levels excepting that including cadmium. The HA showed higher

contents than FA founding the following order concentration : Al > Fe > Zn > Cu > Ni > Cr > Co , Cd in all fractions, this was more abundant in the acid soil.

The content of total polysaccharides in soils and clays oscillated from 0.52 to 1.20 g 100g<sup>-1</sup> with 90% labile character.

There were found the highest percentages of phosphorus (0.04 g 100 g<sup>-1</sup>) and CEC of 115.80 cmol (+) kg<sup>-1</sup> in acid clays. The strongest retention of carbon and nitrogen was found in clay fraction (40 g 100 g<sup>-1</sup>) and in free organic matter fraction (FOM) (45 g 100 g<sup>-1</sup>). The contents of exchangeable ions in the acid clay showed the following order: Mg > Ca > K > Na, whereas in the neutral and alkaline Na<sup>+</sup> has been more abundant than K<sup>+</sup>. Iron retention (70%) was stronger in the organic fraction, while the aluminum (90%) was associated to clay. The analysis of XRD and IR defined presence of feldspars, micas, montmorillonite, illite, kaolinite, halloysite, serpentines type berthierine, lizardite and antigorite, magnetite, maghemite, amorphous and silica polymorphs as opal A of biogenic origin.

The bioessay with *Antirrhinum majus* showed the best growth on cultivated plants in treatment number 16 (clay obtained of the surface layer of acid soil on 80 mg kg<sup>-1</sup> dosis) where all the responses were evaluated as statistically significant. The presence of organic matter sometimes was favorable. In the highest dosis (80 mg kg<sup>-1</sup>) showing the best result in acid treatments meanwhile the minimum dosis (30 mg kg<sup>-1</sup>) were the most favourable in the alkaline soil fractions. The plants in acid substrate had better development than those in the alkaline, due to the optimal concentration of macro and micronutrients, the last promoted best solubility.



### **3. ANTECEDENTES.**

La zona chinampera se caracteriza por tener en muchos de sus suelos contaminación salina o sódica-salina, por el manejo irracional que engloba la acumulación de desechos, el riego con aguas contaminadas y la aplicación excesiva de fertilizantes en relación, con la proximidad del área urbana (Aguilera et al., 1987-1994).

Sin embargo, el origen antrópico de estas chinampas que implicó acumulación de lodo extraído del fondo de la ciénaga, así como la aplicación continua de espesos mantos de plantas acuáticas y estiércol han conferido características favorables a estos suelos, entre las que se pueden citar elevados porcentajes de materia orgánica hasta del 70 g 100 g<sup>-1</sup> y altas capacidades de intercambio catiónico [90-100 cmol (+) kg<sup>-1</sup>] que a veces atenúan los efectos de la salinidad (Cassani, no publicado).

Varias investigaciones han tratado de recuperar suelos de las chinampas a través de estudios a nivel invernadero y campo, utilizando mejoradores orgánicos (composta y estiércoles), mejoradores químicos (cloruro de calcio, cloruro férrico, ácido sulfúrico, yeso), mejoradores biológicos y láminas de lavado. Se han logrado así favorables resultados en la producción de plantas ornamentales como cempoaxochitl, dalia, crisantemo, crisalia, rosa y hortalizas como brócoli, colíflor, lechuga, rábano, espinaca (Aguilera et al., 1987-1994).

Estudios a nivel más detallado se han centrado en la fracción orgánica de estos suelos, principalmente en la dinámica de los AH, encontrando que la complejidad de estas moléculas está muy relacionada con la productividad agrícola; en algunos casos, la mayor aromaticidad promovió mejor producción y en otros se obtuvieron respuestas inversas (García et al., 1990; Reyes, 1992; Mercado, 1993), lo que puede estar en relación con la

continúa agregación de estiércoles y la variabilidad en los grados de salinidad y condiciones medioambientales de las chinampas.

Algunos estudios señalan los efectos de la aplicación de ácidos húmicos sobre el desarrollo de plantas como maíz y cempoaxochitl, en el incremento de longitud de tallo, formación de raíces, peso y porcentaje de nutrientes. Asimismo se ha mencionado su participación en el metabolismo de carbohidratos y proteínas que induce resistencia en la planta durante períodos de sequía y la absorción de sustancias tóxicas existentes en el medio (Frimmel y Christma, 1988; García y Aguilera, 1980; González no publicado).

La determinación de la extinción óptica a 465 y 665 nm ( $E_4/E_6$ ) de los AH enmarca esta relación  $E_4/E_6$  entre 3.8 y 5.8, indicando la relación más elevada un menor grado de transformación o maduración de los AH. En cuanto a la aplicación de espectroscopía de IR, las bandas encontradas a los  $3400\text{ cm}^{-1}$  indican la presencia de grupos OH, a los  $2920\text{ cm}^{-1}$  de C-H alifáticos, a  $1720\text{ cm}^{-1}$  vibraciones de enlaces C=O de COOH y C=O cetónicos,  $1620\text{ cm}^{-1}$  de C=O aromáticos procedentes de quinonas (García et al., 1990; Reyes, 1992; Mercado et al., 1992; Mercado, 1993).

Algunos trabajos en la zona chinampera han cuantificado el contenido de polisacáridos lábiles y totales, así como de lípidos y AF asociados a carbohidratos y fenoles. La identificación de las estructuras específicas de los lípidos encontrados en muestras edáficas de chinampas está en proceso, disponiendo ya de estructuras preliminares que señalan la presencia de ácidos grasos como el palmítico y esteárico, algunos fltalatos (butiléster, isobutiléster y hexiester) (Mercado, 1993; García et al., 1994; Mercado, 1995; Mercado et al., 1992).

Pocos trabajos han investigado la dinámica de la fracción inorgánica (arcilla y minerales primarios), existiendo estudios de caracterización que señalan en la zona presencia de feldspatos, cuarzo y arcilla de tipo montmorillonita y caolinita (Aguilera y Fuentes, 1951; Mercado, 1993; García et al., 1994).

También ha sido estudiada la mineralogía en las fracciones de arena de las chinampas, encontrándose que los piroxenos más abundantes fueron las hiperstenas y los minoritarios la enstatita y la augita; los anfíboles estuvieron representados exclusivamente por la hornblenda, el olivino fue abundante y el zircón, calcita, cuarzo, óxidos de hierro, ilmenita y leucoxenos se presentaron en trazas (Aguilera et al., 1987-1994).

Los estudios de clasificación de suelos de la zona chinampera son contradictorios, pues muchas veces se han seguido clasificaciones inadecuadas a su naturaleza y a sus propiedades, de ahí que se haya constatado la presencia de cambisoles, feozems, vertisoles, solonchacks, andisoles, litosoles, histosoles y gleisoles (Palacios et al., 1990; Alfaro, 1993; Aguirre, 1993).

Sin embargo con base en Rozanov (1990), la morfología de suelos de chinampas no permite distinguir horizontes bien delimitados, por la abundante cantidad de material orgánico y por su continuo uso agrícola., dichas características los clasifican evidentemente dentro del grupo de los antroposoles o antrososoles como lo señalan Aguilera et al., (1987-1994), quedando definido que en esta investigación los suelos estudiados se consideraran como tales y por ello se empleará el término de calicata en lugar de perfil (Rozanov, 1990).

#### **4. REVISION BIBLIOGRAFICA.**

##### **4.1. ¿Que es un organomineral?.**

Los organominerales del suelo son complejos en las que se dan uniones entre materiales inorgánicos como arcillas, óxidos, hidróxidos, feldespatos u otros minerales y materiales orgánicos (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, huminas, proteínas, azúcares, lípidos, carbohidratos, etc.).

Su presencia se reconoció desde hace 6 décadas, ya que estas interacciones afectan diversas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, sin embargo los lagunas del conocimiento en la química de reacciones permanecen invariables debido a la complejidad del sistema involucrado (Huang, 1990).

Los principales mecanismos de enlace entre compuestos orgánicos y minerales son la adsorción física efecto de las fuerzas de van der Waals, la atracción electrostática o adsorción química, los puentes de hidrógeno y la formación de complejos de coordinación .

Las fuerzas de van der Waals se encuentran en todas las moléculas promoviendo enlaces débiles, su producción se da por fluctuaciones dentro de la densidad de carga eléctrica de los átomos, pues son fuerzas que surgen de los momentos dipolares entre átomos o moléculas considerándose que las moléculas polarizadas tienen asimetrías permanentes entre la distribución de sus cargas negativas y positivas.

La importancia de la adsorción por fuerzas de origen físico en moléculas neutras polares y no polares, particularmente en las que tienen altos pesos moleculares, se explica por la naturaleza aditiva de diversas interacciones. En muchos compuestos orgánicos no polares, las fuerzas van der Waals son dominantes en los procesos de adsorción.

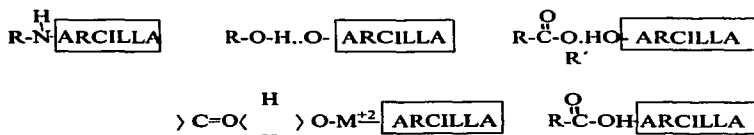
Los enlaces electrostáticos entre arcillas y materia orgánica se establecen a través de procesos de intercambio catiónico o protonación. Su formación se da cuando los cationes orgánicos cargados positivamente reemplazan a cationes inorgánicos sobre el complejo de intercambio:



La adsorción de las moléculas orgánicas que funcionan como bases débiles depende ampliamente del pH tanto de la molécula como del sistema, así como de la longitud de la cadena y el tipo de catión sobre el complejo de intercambio.

Moléculas cargadas positivamente como las aminas y aminoácidos, pueden enlazarse estrechamente con coloides arcillosos por adsorción química, la retención de moléculas orgánicas de bajo peso molecular (con menos de 8 átomos de carbono) tienen relaciones aproximadamente iguales a la capacidad de intercambio catiónico de la arcilla mientras que la adsorción de cationes grandes se limita al área superficial (Stevenson, 1994).

Los puentes de hidrógeno se presentan cuando existen dos átomos electronegativos con un solo ión de  $\text{H}^+$ , por lo que comparten electrones con átomos como el oxígeno. Un sitio de adsorción primaria es la superficie de los oxígenos u OH y otra posibilidad incluye los protones de moléculas de agua. Este enlace es más débil que el iónico o covalente, pero más fuerte que las fuerzas de van der Waals. Un mecanismo típico en que se forman puentes de hidrógeno a superficies arcillosas es la siguiente :



En los enlaces de coordinación el mecanismo de enlace se da con el catión polivalente que actúa como puente entre los componentes del suelo y los grupos COOH de moléculas orgánicas (Stevenson, 1994).

#### Arcilla o materia orgánica-M-OOCR

Los organominerales y organometales se diferencian principalmente porque en los primeros se forman estructuras más complejas entre moléculas cristalinas, coloidales o amorfas y en los organometales la molécula existente es más sencilla, tanto en su constituyente orgánico, que es de menor número de átomos de carbono, como en la parte inorgánica, pues está constituida por iones metálicos, que no se adhieren a estructuras minerales complejas. Sin embargo poseen características de enlace semejantes ya que sus orbitales saturados forman un enlace  $\sigma$  entre los electrones de valencia del carbono y el metal oxidado, existiendo en general junto a los orbitales  $s$  y  $p$  de estos elementos un orbital  $d$  acomodado de forma ideal para que solape con un enlace  $\pi$  insaturado presente en moléculas orgánicas:  $dxy$ ,  $dxz$ ,  $dyz$ ,  $dx^2y^2$  y  $dz^2$ .

Los orbitales metálicos existentes tanto en organominerales como en organometales pueden hibridarse permitiendo rangos amplios de coordinación geométrica con números 1-8 y 4-6, que interactúan con los enlaces  $\pi$  y  $\pi^*$  de moléculas orgánicas insaturadas por donación o aceptación de electrones, lo que modifica la reactividad original e impide fáciles transformaciones (Bochmann, 1994).

Los ligandos pueden ser clasificados con base en el número de electrones que donan al metal central, siendo importante tener en cuenta el número de átomos de carbono que interactúan con el metal central, pues en estructuras más complicadas entre las que podemos incluir los AH y AF, intervienen numerosos ligandos individuales.

La regla de los 18 electrones para alcanzar configuraciones estables que se sigue en la mayoría de complejos organometálicos, es diferente cuando intervienen aminas y moléculas de agua, pues el recuento de electrones excede frecuentemente el número de 18 (Bochmann, 1994). Esta aseveración incluye el caso de las moléculas que constituyen el complejo orgánico del suelo, pues en él ocurren mezclas complejas tanto de proteínas, como de carbohidratos, lípidos, AH, AF, huminas, y concentraciones variables de moléculas de agua dependientes de las condiciones medioambientales circundantes; así también, la enorme diversidad y complejidad estructural del material inorgánico existente en los suelos impiden definir con precisión las interrelaciones entre la multitud de moléculas presentes, sin embargo es obvio que las reglas químicas elementales dan la pauta de inicio para la formación de complejos organominerales.

Prácticamente todos los aspectos de la química de reacciones en el suelo están relacionados con la formación de complejos estables con sustancias orgánicas. La presencia de moléculas metalo-orgánicas pueden originar diversos efectos en el suelo entre los que se pueden mencionar la participación de las sustancias orgánicas en la lixiviación de rocas y minerales transportando sesquióxidos y en los ciclos de elementos traza, aumentando la disponibilidad de micronutrientes en plantas superiores y microorganismos. La formación de organominerales también induce la solubilidad y disponibilidad de fosfatos cuando ocurren complejaciones de fierro y aluminio en suelos ácidos y calcio en materiales

edáficos calcáreos y también reducen la toxicidad de los metales pesados como plomo o cadmio, pues la materia orgánica actúa como amortiguador y disminuye los efectos adversos de los metales pesados tóxicos (Bloom, 1981; Stevenson, 1994).

Los compuestos orgánicos del suelo como ácidos alifáticos simples, aminoácidos, fenoles, ácidos fenólicos y complejos poliméricos fenólicos se asocian con elementos traza de síntesis bioquímicas realizadas por organismos vivos o de la formación de polielectrolitos generados de reacciones secundarias referidas a AF y AH.

Los factores que afectan a la producción de compuestos bioquímicos incluyen el estado de humedad del suelo, el tipo de vegetación y su estado de desarrollo, clima y prácticas de cultivo. Los suelos abonados con estiércoles y residuos orgánicos son ricos en materiales bioquímicos asociados a iones metálicos. Otros compuestos quelantes que se encuentran dentro del suelo de forma natural son los fosfatos orgánicos, el ácido fítico, la clorofila, compuestos de degradación de la clorofila como las porfirinas, azúcares simples y auxinas, sin embargo se desconoce su forma de interactuar y de complejarse con elementos traza, sustancias proteicas y polisacáridos (Stevenson, 1994).

La materia orgánica compleja del suelo está constituida por AH y AF principalmente, los cuales son capaces de asociarse con metales traza y formar sales conocidas como humatos y fulvatos debido a su alto contenido de oxígeno dentro de los grupos funcionales incluidos en su estructura tales como: COOH, OH fenólico y alcohólico OH y C=O, los grupos amino e imino también se involucran (Sposito y Page, 1984).



#### **4.2. Métodos para el estudio en organominerales del suelo.**

Las investigaciones sobre la estructura química de los organominerales se han realizado por métodos en los que se fracciona el suelo total, separando partículas de diferente tamaño o peso, así como por la extracción de fracciones húmicas, fúlvicas y huminas enlazadas a iones metálicos (Oades et al., 1987; Dixon, 1989).

Cuando se fracciona el suelo por tamaño de partícula se obtienen porcentajes de arenas, limos y arcillas definiendo dichos contenidos la textura, que es utilizada como indicativa de la calidad agrícola del suelo, pues en estas fracciones además de la dominancia de arcilla o arena permiten reconocer la presencia de diversos minerales primarios que definen características relacionadas con el material parental y con los nutrientes existentes, lo que en conjunto delimita la fertilidad .

Las diferentes fracciones que se obtengan según el caso se estudian por métodos como la espectroscopía de IR, la espectrofotometría de absorción atómica, de emisión de plasma, resonancia magnética nuclear, difracción de rayos X, determinaciones de constantes de estabilidad, cambios de energía, chromatografía de gases y microscopía electrónica tanto de transmisión como de barrido. Todos estos métodos tienen la finalidad de ser complementarios e identificar grupos funcionales, minerales, estructuras químicas y elementos metálicos.

Estudios a través de espectroscopía de IR permitieron definir asociaciones metálicas de AH y AF en suelos a los que se les aplicó gallinaza, observándose enlaces covalentes coordinados y electrovalentes entre el ión zinc y grupos carboxilo, hidroxifenoles y aminas.

El uso de la resonancia magnética nuclear en suelos arcillo-limosos fraccionados evidenció relaciones entre el tamaño de partícula y los patrones de distribución de los

diferentes tipos, encontrándose que 2/3 partes de carbono unido a las fracciones arcillosas fueron alquílicas, y que materiales orgánicos extraídos de partículas del tamaño del limo eran más aromáticas que las extraídas de partículas de mayor o menor tamaño. A su vez se encontró que las fracciones pesadas tenían más estructuras arcillosas mejor cristalizadas y adsorbidas a macromoléculas orgánicas, estableciéndose que la proporción de carbohidratos fue menor en las fracciones finas cuando las relaciones C/N estuvieron por debajo de 10, y que la presencia de material cérico de origen vegetal incrementó los grupos alquil asociado a la fracción arcillosa. (Prashad y Sinha 1980; Oades et al., 1987).

La cuantificación de metales presentes en sustancias húmicas permitió establecer que los pesos moleculares aumentaron exponencialmente con la concentración de metales trivalentes y linealmente con los metales divalentes, no así con el magnesio que aparentemente no tuvo ningún efecto. La concentración de aluminio y cobre en AH aumentó la agregación (Ritchie y Postner, 1982).

Las determinaciones de las constantes de estabilidad son importantes al ser indicativas de la afinidad del catión por el ligando; los valores numéricos predicen el comportamiento de los metales traza y metales tóxicos en suelos y sedimentos.

Las principales dificultades para determinar las constantes de estabilidad de complejos organominerales radica en que las sustancias húmicas son heterogéneas en cuanto a peso molecular y grupos funcionales, también a que el pH afecta profundamente la ionización de los grupos ácidos y por lo tanto el número de sitios disponibles para el enlace. A su vez existe la posibilidad de que se den interacciones cuando hay sitios de reacción idénticos donde se forma un enlace que afecta los enlaces subsecuentes. Otra complicación

se da en los cambios configuracionales de la macromolécula por pHs o diferentes concentraciones salinas (Dixon, 1989).

Existen varios datos de constantes de estabilidad reportadas para complejos metal-humus que plantean problemas cuando se usan como datos termodinámicos y se trata de predecir la especiación de elementos traza dentro de la solución del suelo. Por ejemplo, modelos basados en valores altos, predicen que cerca del 90% de elementos traza se presentan complejados a moléculas orgánicas, sin embargo modelos en los que los valores son bajos predicen que solo el 10% puede enlazarse a moléculas orgánicas; por ello se requiere investigar profundamente sobre la formación de complejos polinucleares (Stevenson, 1994)

En lo que se refiere a estudios de microscopía electrónica, existen trabajos iniciales en los que se separaron y estudiaron fracciones arcillosas con el objetivo de ver la acción de algunos microorganismos en el proceso de formación de microagregados arcillosos y su morfología, las imágenes publicadas definieron la presencia de gomas envolventes de material fino, grueso, y arborescente agregando material arcilloso, así como de células de hongos, esporas, hifas y bacterias unidas a material arcilloso (Aguilera et al., 1956).

Estudios de fracciones de materia orgánica libre y pesada asociadas a limos, arcillas, cationes y óxidos de hierro y aluminio definieron que en la fracción ligera ( $L_1$ ) separada por flotación en  $H_3PO_4$ , se observaron fragmentos tisulares de hojas, tricomas, semillas y cutículas de insectos, mientras que en la fracción  $L_2$  separada con bromoformo-etanol 50% v:v aparecieron restos vegetales descompuestos y amorfos así como material finamente dividido y asociado a material mineral ( Almendros et al., 1979).

La morfología estructural de AH y AF así como de asociaciones de AF unidos a cobre, aluminio y hierro ferroso ó férrico en microscopía electrónica de barrido varió con el pH, a valores bajos (2-3) los AF presentaron series de fibras elongadas que formaban estructuras cerradas. Conforme se incrementó el pH (4-7), las fibras formaron se acumularon dentro de una fina cubierta de malla esponjosa, valores mayores de 7 mejoraron su orientación, pHs entre 8 y 9 formaron capas gruesas, y rangos entre 9 y 10 definieron granos homogéncos (Cheng y Schnitzer, 1976)

#### **4.3. Estructura química de los minerales del suelo.**

Para comprender la complejidad de la estructura y reactividad de los organominerales es necesario dar un panorama general de las características estructurales de los minerales. Estos son materiales sólidos con ordenamientos atómicos internos caracterizados por periodicidades y regularidades tridimensionales perfectas, donde múltiples unidades estructurales se enlazan formando un cristal.

El ordenamiento de átomos dentro de un espacio cristalino se especifica en términos de tamaño y forma tridimensional, determinando la celda unidad que varía para minerales dentro del rango de 0.3 a 3.0 nm y la posición de los átomos está dada por sus coordenadas x, y, z.

Cuando las formas irregulares se repiten más en la estructura que las regiones periódicas regulares se constituyen los sólidos no cristalinos o amorfos, que no generan patrones difracción de rayos X.

**El término cristalino referido a arcillas usualmente se da en regiones con estructuras regulares de por lo menos 10 ó 20 átomos con tamaños cercanos entre 3 y 6 nm (Brown et al., 1978).**

**La composición mineralógica del suelo es muy variable y depende de la composición de las rocas; generalmente dominan los silicatos u óxidos que están compuestos principalmente de O<sub>2</sub>, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na y K.**

**Las estructuras principales en la formación de silicatos son los tetraedros Si-O, por ello son parte fundamental en su clasificación, existiendo 6 grupos principales (Ford, 1984).**

**1. Los nesosilicatos caracterizados por una relación Si/O baja, que evidencia que los tetraedros estan de forma aislada, enlazados lateralmente a diferentes cationes. Los olivinos son los minerales más importantes dentro de este grupo.**

**2. Los sorosilicatos, donde los tetraedros se unen entre si compartiendo algún oxígeno, de modo que se constituyan grupos de 2 tetraedros que se enlazan entre si por cationes metálicos (por ejemplo la. epidota).**

**3. Los ciclosilicatos, caracterizados porque forman anillos cerrados cuando se unen varios tetraedros generalmente 6. Poseen un déficit de cargas positivas compensadas por diferentes cationes que enlazan a los anillos entre si (por ejemplo la turmalina).**

**4. Los inosilicatos, que forman largas cadenas de tetraedros a través de enlaces con oxígenos. Los principales minerales de este tipo son los piroxenos que tienen cadenas de tetraedros sencillas y los anfíboles constituidos por cadenas dobles de tetraedros, las cuales se constituyen por la unión lateral a través de iones oxígeno de 2 cadenas sencillas dispuestos de forma hexagonal [por ejemplo los minerales ferromagnesianos como los piroxenos (augita) y anfíboles (hornblenda)].**

5. Los filosilicatos, caracterizados porque sus tetraedros se unen entre sí compartiendo 3 de sus oxígenos constituyéndose una lámina octaédrica que se liga a la tetraédrica a través de oxígenos libres. La mayoría están constituidos por 2 láminas tetraédricas ligadas a través de una lámina central octaédrica, estas capas se van apilando dejando un espaciado de intercapa que puede o no estar ocupado por moléculas de agua y/o cationes, estos se conocen como tipo 2:1. Otros filosilicatos tienen capas formadas únicamente por una lámina tetraédrica y octaédrica, conociéndoseles como tipo 1:1 (por ejemplo, micas, cloritas, pirofilitas, serpentinas).

6. Los tectosilicatos se establecen por la unión de tetraedros, donde cada tetraedro comparte 4 oxígenos con tetraedros vecinos. Cuando los huecos centrales de los tetraedros están ocupados por  $\text{Si}^{+4}$ , la estructura resulta eléctricamente neutra, sin embargo el  $\text{Al}^{+3}$  puede reemplazar al  $\text{Si}^{+4}$ , originándose un déficit de cargas positivas, que se compensan al entrar cationes a la red (por ejemplo cuarzo, feldespatos).

Los minerales arcillosos son silicatos de origen secundario formados como productos de la meteorización, por alteraciones hidrotermales o procesos de diagénesis. Se ubican dentro de los filosilicatos y son muy similares estructuralmente a las micas, aunque algunos presentan estructuras similares a los inosilicatos.

Las arcillas con capas 1:1 están caracterizadas principalmente por caolinitas, las de tipo 2:1 por esmectitas (montmorillonitas, beidellitas, nontronitas, saponitas y hectoritas) y las de tipo 2:1:1 por las cloritas.

En el suelo existen grupos de minerales que no pertenecen a los silicatos, tal es el caso de los fosfatados como el apatito y los carbonatos como la calcita, la aragonita y la dolomita

En general, se conocen 2 grupos principales de minerales: los primarios y los secundarios. Los primeros se originan a partir de material parental o por neoformación; pertenecen a este grupo el cuarzo, feldespatos, micas, ferromagnesianos (piroxenos y anfíboles), silicatos de magnesio (serpentinias), minerales fosfatados (apatitos), y carbonatos (calcita, aragonita y dolomita). Los minerales secundarios se forman por meteorización de los primarios; se incluyen en este grupo el alofano, imogolita y diferentes tipos de arcillas (caolinitas, haloisitas, esmectitas, illitas, vermiculitas, cloritas, interestratificadas, sesquióxidos) además de minerales con sílice que no pertenecen a ninguno de los grupos de minerales silicatados; ópalo, cuarzo, tridimita y  $\alpha$  cristobalita.

La superficie del suelo se encuentra en función de la naturaleza y propiedades de los minerales cristalinos y no cristalinos asimismo la frecuencia de distribución de minerales secundarios en suelos es gobernada por la capacidad e intensidad de los factores de formación (Huang, 1990).

Parte de la superficie de grupos funcionales de minerales llevan carga, su naturaleza se resume así:

Carga negativa: Puede ser constante o variable, la primera se origina de imperfecciones estructurales, de sustituciones iónicas o sitios vacíos en los minerales arcillosos, como las que se presentan en las capas de silicatos expandibles 2:1 de vermiculitas y esmectitas. La carga variable se asocia al pH, debido al carácter anfótero de las moléculas que promueve cargas positivas o negativas, dependientes del punto isoeléctrico, los hidróxidos de intercapas y superficies externas de silicatos, constituyen las fuentes principales de cargas variables de los componentes inorgánicos del suelo.

**Carga positiva:** Se origina de hidróxidos de aluminio y fierro así como de bordes cristalinos de minerales arcillosos. Algunos de estos constituyentes reaccionan como bases, aceptando protones de la solución del suelo circundante (Figura No. 1).

**Punto de carga cero (PZC).** Se origina cuando la densidad de carga positiva y negativa es igual, se promueve por un valor de pH determinado que a su vez depende de su entorno, de la valencia del catión, estado de hidratación del sólido y disposición geométrica de los iones (Huang, 1990).

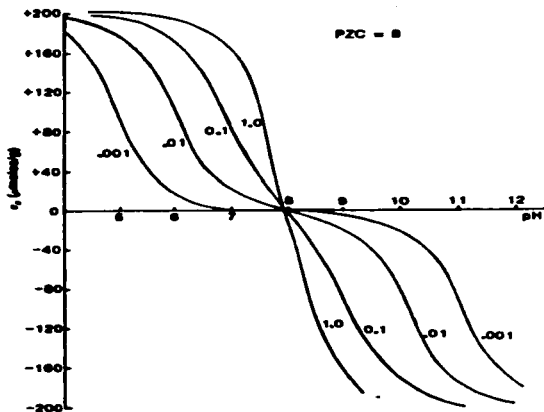


Figura No.1. Superficie de carga neta de un óxido anfotérico hipotético con punto de carga cero (PZC) de 8, calculado para concentraciones de electrolitos de 0.001 a 1.0 M.



#### **4.4. Estructura química de los materiales húmicos y orgánicos.**

Si en los suelos naturales, el humus está constituido por residuos vegetales o animales sometidos a un proceso continuo de biodegradación, transformación y neoformación biofísicoquímica, en los suelos del área lacustre estudiada, las frecuentes incorporaciones de estiércol, a veces de composta y la presencia de vegetación acuática, confiere características peculiares al humus de las chinampas; el análisis de su composición química denota la existencia de una mezcla de moléculas de carbohidratos, proteínas, lípidos y ácidos orgánicos que tienen permanencia efímera en el suelo a menos que se complejen a materiales más resistentes como las arcillas, este grupo de constituyentes tienen estructuras conocidas en química orgánica.

La materia orgánica humificada está constituida por diversas fracciones AH, AF y huminas también denominadas sustancias húmicas.

La estructura química de los AH esta constituida por anillos aromáticos tipo di o trihidroxifenólicos y quinónicos y cadenas alifáticas que incluyen constituyentes como los ácidos grasos. En esta estructura se ha demostrado la presencia de grupos funcionales carboxilo (COOH) como sustituyentes de anillos aromáticos o cadenas lineales, hidroxilos (OH) alifáticos o fenólicos, aminas primarias (-NH<sub>2</sub>), secundarias (-NH-), terciarias (-N=) y carbonilos (C=O) cetónicos o quinónicos .

En general, las representaciones estructurales de los AH se basan en la existencia de polifenoles formados a partir de la lignina o de síntesis microbiana. Las Figuras No. 2 y 3 representan las estructuras hipotéticas más completas, su peso molecular varia de 30 000 a 50 000 unidades dalton (UD) y su tamaño varía entre 100 a 300 Å (Stevenson, 1994).

Los AF se caracterizan porque dos terceras partes o más de los componentes son cadenas alifáticas y contienen más oxígeno y grupos funcionales COOH que los AH. También es importante señalar que el oxígeno de los AF se asocia a grupos COOH, OH y C=O, mientras que en los AH estan en mayores porcentajes como componente del esqueleto carbonado del núcleo.

Los AF constan de ácidos fenólicos y bencenocarboxílicos, su peso molecular varía de 2 000 a 10 000 UD, algunos de los modelos estructurales se aprecian en la Figura No. 4 (Schnitzer, 1978).

La fracción denominada humina se divide en 2 tipos principales basados en su separación, la humina heredada se caracteriza por tener enlaces lábiles con la fracción arcilla, por lo que se aísla por tratamientos con ultrasonido; está constituída por componentes vegetales recientemente transformados por demetoxilación y oxidación, sus componentes principales son macromoléculas semejantes a la lignina y/o polímeros lipídicos (cutina, suberina, etc); la otra clase de humina se conoce como de insolubilización, que se subdivide en base a su tipo de extracción; si se rompen los enlaces con la fracción mineral a través de agentes químicos como el HCl y HF y después se puede extraer el material con agentes alcalinos como pirofosfato o hidróxido de sodio se constituye la humina de insolubilización extraíble. El residuo que no se puede extraer y permanece asociado a la fracción mineral se conoce como humina de insolubilización no extraíble, puede representar del 20-80% del carbono del suelo. Estas huminas tienen estructuras químicas muy semejantes a la de AH, con nucleos policondensados, pocos grupos funcionales y pesos moleculares de más de 10 000 UD, pueden incluir constituyentes del tipo de melaninas fúngicas y sustancias parafínicas; también han sido identificadas dentro

de esta fracción cantidades significativas de hidrocarburos y poliésteres, tales como cutinas y suberinas (Almendros, 1980; Almendros y González-Vila, 1987; Almendros y Sanz, 1991; Almendros y Sanz, 1992).

Teniendo en cuenta la complejidad estructural de la asociación de moléculas húmicas (AH, AF, huminas) y no húmicas (proteínas, lípidos, azúcares, ácidos orgánicos), la actividad física y química de la materia orgánica es compleja, asociándose a importantes funciones en el suelo como la de intercambio catiónico, la capacidad buffer y la formación de complejos organominerales mencionada anteriormente.

En el complejo adsorbente del suelo la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de la fracción orgánica está vinculada a la presencia de grupos funcionales disociados con carga negativa como los OH, COOH,  $-(COO^-)$  presentes en carbohidratos, ácidos aromáticos y alifáticos y sobre todo de grupos ionizados OH fenólicos y COOH de las sustancias húmicas, que retienen diversos cationes, lo que interviene en la amortiguación ácido-base (Stevenson, 1994).

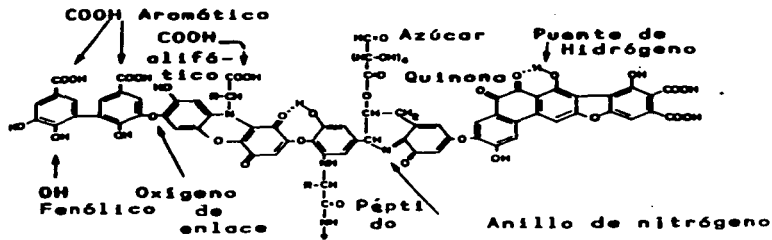


Figura No 2. Estructura hipotética de AH (Stevenson, 1994).

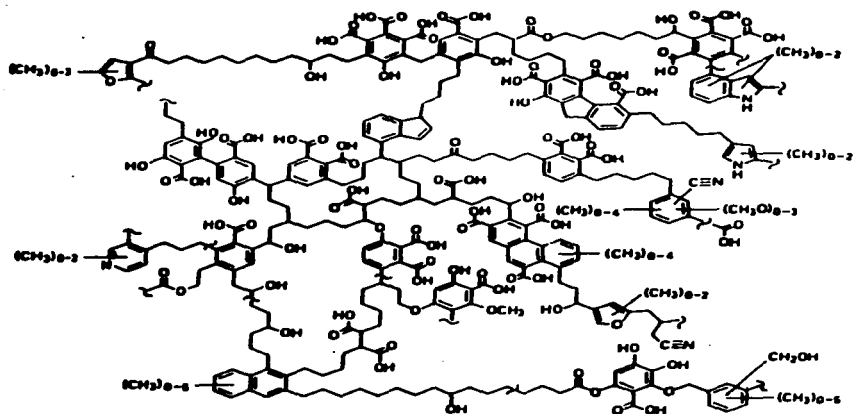


Figura No.3.Estructura química de ácidos húmicos de acuerdo a Schulten y Schnitzer citado por Stevenson (1994).

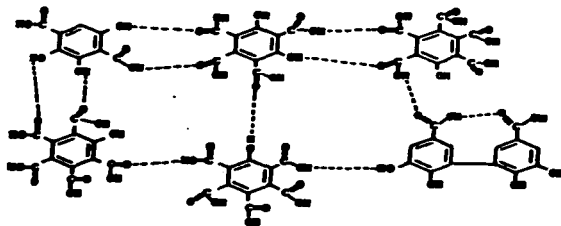


Figura No.4.Estructura de ácidos fúlvicos propuesta por Schnitzer (Stevenson, 1994) .

#### **4.5. Minerales del suelo como catalizadores en la formación de sustancias húmicas.**

Los mecanismos de formación de sustancias húmicas son procesos muy complejos participando una gran variedad de compuestos orgánicos como los carbohidratos y sustancias fenólicas y nitrogenadas como materiales precursores. Las sustancias húmicas se sintetizan a través de procesos bióticos y abióticos, se ha demostrado que la polimerización oxidativa de polifenoles es importante para su formación, y que se acelera por vía enzimática. Se considera que los minerales son importantes en la catálisis y polimerización abiótica de compuestos fenólicos que desemboca en la formación de sustancias húmicas (Wang et al., 1986).

Los óxidos de Mn (bimesita, criptomelano y pirolusita) intervienen activamente en la polimerización de compuestos fenólicos y la posterior formación de AH, pues actúan como ácidos de Lewis aceptando electrones de difenoles y permiten una polimerización oxidativa. Parece ser que los difenoles se transforman en AH al producir semiquinonas durante la reducción de óxidos de manganeso; se deduce que el nivel de disolución del oxígeno es de especial importancia en la formación abiótica de polímeros húmicos (Huang, 1990).

Los óxidos y oxihidróxidos de hierro promueven la oxidación y polimerización de hidroxiquinona a pHs de 3 a 7, existe una secuencia general del poder de oxidación catalítico de estos óxidos en el sentido: hidrohematita > maghemita > lepidocrocita > hematita.(Shindo y Huang, 1984).

Los hidróxidos de aluminio catalizan la oxidación y polimerización de polifenoles húmicos, existen estudios que señalan que la producción de sustancias húmicas formadas de catecol y pirogalol fue mayor en presencia de óxidos de aluminio que en su ausencia, pues el  $Al^{+3}$  se compleja con polifenoles y radicales semiquinona promoviendo la deslocalización de electrones de átomos de oxígeno dentro del anillo aromático (Wang et al., 1983).

Al preparar una mezcla de cuarzo y AH, se observó la disolución total de oxígeno con liberación de  $CO_2$ , lo que implicó despolimerización de moléculas orgánicas (Ribault, 1971).

Existen también estudios de la acción catalítica de los minerales arcillosos en la formación abiótica de sustancias húmicas a través de polimerizaciones oxidativas de compuestos fenólicos comunes en suelos, plantas y metabolitos microbianos, se menciona que la expansión que se da en las arcillas origina superficies internas entre las capas interlaminares de silicatos que modifican diversas reacciones tanto por su densidad de carga como por efecto estérico sobre el sustrato. Asimismo se ha mostrado la formación de radicales aromáticos en superficies intercristalinas de capas silicatadas saturadas con metales de transición y se ha demostrado que los minerales arcillosos ejercen marcados efectos en el crecimiento de microorganismos del suelo, lo que promueve la formación del humus (Wang et al., 1980; Pinnavaia et al., 1974; Haider et al., 1975).

Solomon y Hawthorne (1983) señalan que las arcillas catalizan la polimerización de aminoácidos y que la química de superficies arcillosas cambia con el contenido de agua, puesto que afecta la acidez Brönsted, por lo que es lógico pensar que la alternancia de

ciclos húmedos en sistemas donde existen complejos arcilla humus promueva la polimerización de aminoácidos.

#### **4.6. La biodegradación y la acción protectora de los minerales del suelo.**

Un aspecto interesante poco estudiado es el efecto protector de las arcillas hacia diversas bacterias. Se han efectuado trabajos en los que se analiza la influencia de bentonitas, montmorillonitas, caolinitas, illitas y vermiculitas en la supervivencia de microorganismos, ésto se basa en que el tipo y cantidad de arcilla presente afecta la matriz del suelo en aspectos de agregación, porosidad y permeabilidad, por lo tanto en la sobrevivencia y actividad bacteriana.

Se ha señalado que la montmorillonita, proporciona protección contra la desecación, altas temperaturas, rayos X y procesos metabólicos inducidos por cambios de pH a la bacteria *Rhizobium* y que *Escherichia coli* fue protegida de fagolisis. Asimismo, se ha demostrado que la sobrevivencia de *Pseudomonas fluorescens* fue mayor en vermiculita que en montmorillonita e illita. Sin embargo es poco conocido como los diferentes tipos de arcilla influyen en la supervivencia bacteriana; muchos lo han atribuido al tamaño de partícula, al área superficial, al contenido de humedad, a la capacidad de intercambio catiónico o al estado nutritivo.

En general, se dice que las arcillas proporcionan una especie de microhabitat que impide la depredación de las bacterias por diversos protozoarios y que cuando las células bacterianas se adsorben a partículas arcillosas ocurren incrementos en masa y volumen, que impiden que los microorganismos depredadores puedan ingerir a estas bacterias por su gran tamaño. (England et al., 1993).

El rango de descomposición y estabilización de carbono en los residuos del suelo depende de la textura y de factores climático ambientales entre los que se pueden señalar temperatura, humedad, pH y disponibilidad de nutrientes. Se conoce que el incremento de temperatura acelera la descomposición de materiales orgánicos, mientras que su disminución favorece la estabilización de carbono residual en forma de humus (Martin y Haider, 1986; Paul y van Veen, 1978; Jenkinson y Rainer, 1977; Stott et al., 1983).

Se ha concluido que el carbono estable en el suelo está ampliamente relacionado con la cantidad y naturaleza de arcillas; suelos con alto contenido de arcilla, especialmente con alta CIC retienen más fracciones húmicas, lo que origina descomposiciones más lentas. Existen estudios que indican que la montmorillonita impide la biodegradación de metabolitos microbianos y que la caolinita tiene poco efecto en la estabilización del carbono de aminoácidos (Jenkinson, 1977; Sorensen, 1975).

La biodegradación de sustancias húmicas es aún más lenta cuando retienen en su estructura iones metálicos unidos a arcillas, pues se dan adsorciones entre capas expandibles arcillosas y los iones de intercambio a través de fuerzas de van der Waals y puentes de hidrógeno que incrementan las resistencias de enlace, por lo que se requiere más energía para romper los polímeros húmicos. Cuando existen proteínas asociadas a arcillas, su degradación se relaciona con las concentraciones, valencias, iones presentes en la superficie arcillosa, pH, tamaño y grupos activos de la proteína. La lignina es el segundo polímero más abundante en los residuos vegetales, su estructura química la hace más resistente a la biodegradación, sufre alteraciones profundas con los incrementos de acidez, de grupos COOH y disminución de grupos metoxilo. (Mortland, 1970; Theng, 1979; Stotzky, 1986).



Los suelos alofánicos estabilizan fuertemente el carbono orgánico y la biodegradación húmica requiere un tiempo promedio de 2000 a 5000 años, atribuible a que ocurren asociaciones con óxidos e hidróxidos de aluminio y hierro del alófono así como a que la fracción de AF, a veces se une a elevadas concentraciones de sílice, originando la formación de numerosos complejos organominerales (Wada y Aomine, 1973).

El rango de pérdida de CO<sub>2</sub> es menor en suelos alofánicos que en no alofánicos. La presencia de alófono en suelos o la adición del 5 al 16% en suelos arenosos disminuye la pérdida de carbono de 16 a 75 % ; también se ha observado que ligninas vegetales y melaninas fúngicas se degradan en menor porcentaje en suelos alofánicos que en otros tipos de suelos agrícolas. La acción protectora se debe principalmente a la adsorción de materia orgánica por minerales arcillosos o a la reacción de coloides minerales y materia orgánica del suelo que forma complejos organominerales (Martin et al., 1982).

Varios productos orgánicos de microorganismos solubilizan materiales minerales, sin embargo los ácidos orgánicos son los más involucrados en éste fenómeno. Numerosas poblaciones microbianas asociadas al material parental del suelo producen elevadas concentraciones de ácidos orgánicos y gran descomposición de minerales silicatados. La mayoría de los hongos activos, así como algunas bacterias y líquenes disuelven silicatos, debido a que producen ácidos di y tricarbónicos como el oxálico o cítrico y además hidroxámicos considerados como quelatantes muy potentes.

Las concentraciones aproximadas de los principales quelatantes en la solución del suelo son: ácidos orgánicos simples  $1 \times 10^{-3}$  -  $4 \times 10^{-3}$  M, aminoácidos  $8 \times 10^{-5}$  -  $6 \times 10^{-4}$  M, ácidos fenólicos  $5 \times 10^{-5}$  -  $3 \times 10^{-4}$  M, hidroxamatos sideróforos  $1 \times 10^{-8}$  -  $1 \times 10^{-7}$

La actividad de los AH y AF en la degradación química de silicatos ha sido descrita en la literatura varias veces y también se han publicado estudios cinéticos acerca de la solubilización con ácidos cítrico, oxálico y salicílico en el olivino, hornblenda, turmalina, biotita y microclina (Dixon, 1989; Stevenson, 1994).

#### **4.7. Interacciones de enzimas con arcillas y material orgánico.**

Las enzimas son importantes dentro de numerosos procesos de catálisis en el suelo, han sido asociadas con el crecimiento vegetal y en algunos casos se utilizan como índices de fertilidad, ejemplos de ello son las carbohidrasas que participan en el ciclo del carbono y en la agregación del suelo, proteinasas, amidasas y deaminasas que intervienen en el ciclo del nitrógeno y transformación de materiales celulósicos, así como las oxidoreductasas relacionadas con el proceso de humificación (Kiss et al., 1975; Sarkar et al., 1988; Sarkar y Burns, 1984).

La inmovilización de las enzimas en el suelo y los valores de alteración del pH óptimo para su máxima catálisis, estabilidad y actividad cinética en el suelo, se favorecen por su asociación con material arcilloso o húmico, tal es el caso de las oxidoreductasas e hidrolasas en suelos bentoníticos y caoliníticos. La mayoría de los autores que han analizado el proceso de estabilización de las enzimas por interacción con las arcillas señalan que los metales enmascaran a los grupos catalíticos activos. Así, por ejemplo, la actividad de ciertas enzimas depende de la presencia de aminoácidos libres y grupos sulfhidrilo, que se inhiben por presencia de metales.

La actividad enzimática se asocia a la textura existente en el suelo, después de la adición de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{HgCl}_2$ , la actividad de la deshidrogenasa, disminuye 60% en

suelos arcillosos y de 90 a 100% en arenosos. La exposición continua de suelos a altas concentraciones de metales pesados, conduce a marcadas disminuciones de la actividad enzimática (Tyler, 1981; Van Faassen, 1973; Marshman y Marshall, 1981; Stotzky, 1986; Verna et al., 1975).

Las enzimas que se adsorben sobre arcillas tienen menor actividad que las enzimas libres.. Existen relaciones entre la actividad enzimática y el tipo de arcilla, encontrándose la siguiente gradación esmectita > illita > caolinita.

Las metaloenzimas más importantes provenientes de actividades microbianas como las dehidrogenasas, fosfatasas, proteasas, y carboxilasas, tienen zinc y hierro, algunas poseen en su estructura cobre, cobalto, manganeso y selenio (Tyler, 1981).

Los antibióticos producidos en el suelo o adicionados son rápidamente desactivados por biodegradación. Antibióticos como estreptomycin, neomicina y polimixina se adsorben en las superficies reactivas de la montmorillonita, mientras que los antibióticos anfotéricos como clortetraciclina forman capas monomoleculares en la superficie arcillosa. Los antibióticos, pueden ser liberados de caolinita, pero no de montmorillonita (Gottlieb, 1976).

Los pocos trabajos que existen de interacción de enzimas en sistemas naturales arcilla-materia orgánica se han realizado en sistemas con moléculas orgánicas adsorbidos a superficies arcillosas, llegando a la conclusión de que cada catión influye de manera diferente sobre las propiedades adsorbentes de las enzimas y materia orgánica (Garwood et al., 1983; Boyd y Mortland 1985; Theng, 1979; Stotzky, 1986; Burns, 1986).

## **5. OBJETIVOS.**

### **General.**

Investigar las características físico-químicas de los coloides minerales y orgánicos de suelos de la zona chinampera Xochimilco-Tláhuac y establecer su influencia en el crecimiento inicial de *Antirrhinum majus*.

### **Específicos.**

5.1. Obtener organominerales a través del fraccionamiento granulométrico del suelo, extrayendo coloides orgánicos (AH y AF) y minerales (arcillas) .

5.2. Determinar las características físicas y químicas de cada una de las fracciones obtenidas para deducir sus propiedades.

5.3. Evaluar la influencia en el crecimiento inicial de *Antirrhinum majus* descriptor del complejo arcilla humus (CAH) y arcilla extraídos de suelos chinamperos.

## **6. METODOLOGIA.**

### **6.1. Muestreo de suelos.**

Con base en el muestreo y características fisicoquímicas de 120 calicatas, se seleccionaron y recolectaron 3 suelos del área chinampera con diferentes rangos de pH, conductividad eléctrica, salinidad y contenidos de materia orgánica.

La ubicación de cada suelo estudiado se aprecia en la Figura No. 5, la calicata No. 56 (C56) se encuentra en San Gregorio Atlapulco, se caracteriza por tener pH ácido de 4.1 a 6.1, conductividad eléctrica baja de 3.1 a 3.9  $\text{dS m}^{-1}$  y contenidos de materia orgánica de 9.4 a 31.07 %. La calicata No. 63 (C63), se localiza en San Luis Tlaxiatalmalco, tiene valores de pH cercanos a la neutralidad de 6.8 a 7.3, conductividades eléctricas de 2 a 3.4  $\text{dS m}^{-1}$  y porcentajes de materia orgánica de 2.7 a 11.5%. Finalmente el suelo alcalino (C69) se colectó en la zona de Tláhuac, se caracteriza por tener pH de 7.8 a 9.3, conductividad eléctrica de 4.6 a 23.2  $\text{dS m}^{-1}$  y contenidos de materia orgánica de 4.6 a 11.5 %.

En cada suelo se recolectaron capas a intervalos de 10 cm, las superficiales de 0-10 y de 10-20 cm, las caracterizadas por tener colores blancos (capa blanca) de profundidad variable, y las profundas cercanas al manto freático (180-190 ó 190-200 cm).

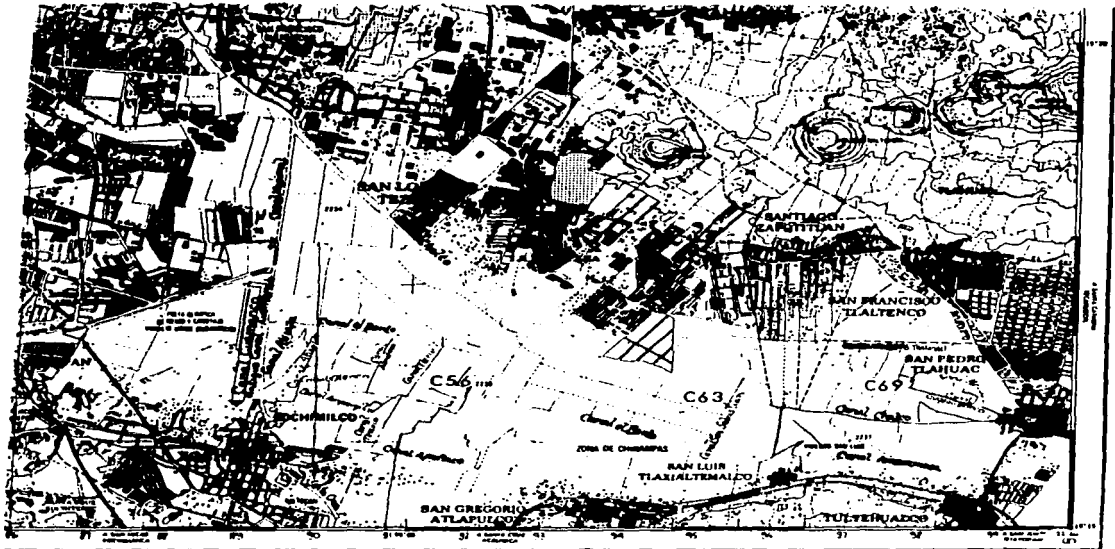


Figura No. 5 Ubicación de las calicatas muestreadas dentro de la carta topográfica E<sub>14</sub>A<sub>39</sub> de la ciudad de México escala 1:50,000.

## **6.2. Análisis físicos y químicos de muestras edáficas.**

Las muestras se analizaron física y químicamente con las siguientes metodologías:

Color en seco y en húmedo por el método Munsell (Munsell, 1992).

Densidad aparente por el método de probeta (Baver, 1956).

Densidad real por el método del picnómetro (Baver, 1956).

Reacción del suelo (pH) por el método del potenciómetro. Se uso un aparato Corning Modelo 7. La determinación se hizo en agua destilada y solución salina (KCl 1 M pH 7) con una relación 1:5.

Materia orgánica por el método de Walkley y Black, modificado por Walkley (Jackson, 1982).

Calcio y magnesio intercambiables por el método de extracción con acetato de amonio (1 M pH 7) y valoración por el método del Versenato (EDTA 0.02 M) (Jackson, 1982).

Sodio y potasio intercambiables por el método de extracción con acetato de amonio (1M pH 7) y espectroscopía de emisión de llama (Jackson, 1982).

Capacidad de intercambio catiónico total por el método de centrifugación, saturando con CaCl<sub>2</sub> (1 M pH 7), lavando con alcohol etílico al 96% y eluyendo con NaCl (1M pH 7). La valoración se realizó con versenato (EDTA 0.02 M) y negro de ericromo T (Jackson, 1982).

Conductividad eléctrica en el extracto de saturación mediante el puente de conductividad Orion Modelo 160 (Jackson, 1982).

Fósforo asimilable por los métodos de Olsen y Bray I. (Jackson , 1982).

Nitrógeno total por el método de Kjeldahl (Jackson , 1982).

### **6.3. Fraccionamiento del suelo.**

Las muestras del suelo total se fraccionaron por tamaño y con reactivos alcalinos, por lo tanto se obtuvieron, por un lado, arcillas, limos y arenas (fracciones minerales) y, por otro, fracciones orgánicas (AH, AF y huminas).

La separación de fracciones por tamaño se hizo por tamizado en húmedo con 50 g de suelo y 3 L<sup>-1</sup> de agua, aplicando ultrasonido con potencia de trabajo de 60% durante 10 minutos con un aparato Fisher modelo 150. Las arenas se separaron con un tamiz de malla No. 325 equivalente a 0.05 mm y las fracciones más finas (arcillas y limos) usando centrifugación y tiempos, de sedimentación calculados con base en la Ley de Stokes y ajustando el tiempo de caída de partícula con la temperatura. La fracción líquida donde se encontraba dispersada la arcilla se centrifugó a 20,000 rpm durante 20 minutos para concentrar la muestra y se puso a secar en cápsulas de porcelana; no se usó ningún dispersante químico.

Las fracciones obtenidas por tamizado en húmedo, tiempo de sedimentación y centrifugación fueron las siguientes: Complejo arcilla humus (CAH), complejo limo fino-humus (CLF-H), complejo limo medio-humus (CLM-H), complejo limo grueso-humus (CLG-H), complejo arena-humus (CAr-H) y cuando se eliminaron los contenidos de materia orgánica, donde a 5 gramos de muestra problema se le agregaron 10 veces 10 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30% v:v completando un total de 100 ml, se mantuvo a una temperatura de 60 °C, hasta sequedad y se lavaron 5 veces con agua destilada, se obtuvieron arcilla, limo fino, limo medio, limo grueso y arena.



Las fracciones orgánicas se separaron usando de 25 a 50 g de suelo conservando 1 mg de carbono por cada 300 ml de extractante, esto significó una relación aproximada de 1:10. Al suelo se le agregaron 3 veces 150 ml de mezcla bromoformo-etanol a densidad de  $1.6 \text{ g ml}^{-1}$ , la mezcla se agitó durante 10 minutos a velocidad de 220 rpm con agitador de varilla Caframo RZR1, se centrifugó durante 20 minutos para obtener la MOL. El mismo tratamiento se hizo al residuo de separación de la MOL para obtener la humina heredada ( $H_3$  o Hh), pero además se aplicó la acción del ultrasonido durante 2 minutos.

Posteriormente, para obtener los AH y los AF del residuo de separación de la MOL se añadieron varias veces 150 ml de  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  0.1 M y NaOH 0.1 M, agitando 15 minutos a 220 rpm y centrifugando.

Después de esta extracción, el residuo se mantuvo a una temperatura de  $60^\circ\text{C}$ , durante 20 minutos con 50 ml de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  agitando y centrifugando tres veces, asimismo se trató la muestra con HCl-HF 1M y HF 1M esto con el fin de desmineralizar las muestras y romper los enlaces de las fracciones orgánicas con las arcillas.

Al finalizar este tratamiento se procedió a la extracción del carbono con NaOH 0.5 M, de la denominada humina de insolubilización extraíble ( $H_1$ ). Y al residuo se le denomina humina de insolubilización no extraíble ( $H_2$ ) (Merlet, 1971).

Para cuantificar el carbono de los AF aromáticos y alifáticos, 100 ml del extracto de AF se pasaron por una columna de polivinil pirrolidona (PVP), los que quedaron adsorbidos en la resina se denominan aromáticos o adsorbidos, incluyéndose en esta fracción, ácido vainillíco, sinérgico o p-hidroxibenzoico y los que no se adsorben son llamados alifáticos (Lowe, 1975).

A las fracciones minerales separadas por tamaño (arcillas, limos y arenas), se les registró su peso y se determinó el porcentaje de carbono, nitrógeno total, fósforo asimilable, iones intercambiables y CIC, mientras que a las fracciones orgánicas (AH, AF y huminas), solo se les registró su peso y se determinó su porcentaje en carbono.

De las muestras totales fraccionadas se seleccionaron las arcillas, los complejos arcilla humus (CAH), los AH y los AF, para caracterizarlos por espectroscopía de IR, difracción de rayos X, MEB, MET y determinación de algunos metales con el espectrofotómetro de emisión de plasma.

#### **6.4. Electroforesis.**

Los AH extraídos según la técnica de Merlet (1971) se solubilizaron en NaOH 0.5 M, se aplicaron en tiras de papel Whatman de  $4 \times 35$  cm, se secaron y se impregnaron con una solución tampon de tetraborato sódico ( $9.8 \text{ g L}^{-1}$ ) pH 8. Cada tira de papel húmedo preparada se colocó en una cubeta "Desaga" de electroforesis y se desarrolló el electroforegrama durante 30 minutos a una intensidad de 200 V. La integración de los electroforegramas se realizó con el densitómetro Gelman DCD 16, se les cuantificó el área porcentual del electroforegrama con un planímetro y se obtuvieron así las fracciones móviles (poco polimerizadas) e inmóviles (muy polimerizadas) (Dorado et al., 1972).

#### **6.5. Espectroscopía de infrarrojo .**

Los espectros de IR se hicieron preparando pastillas de 1g, que contenían 99% de KBr y 1% de muestra problema. El material se mezcló bien moléndolo en mortero de ágata y compactándolo a través de una prensa que produce 10 toneladas de presión por  $\text{cm}^2$ . La

pastilla se colocó en un espectrómetro de IR Perkin Elmer modelo 683 y se adquirió el espectro entre 4600 y 400  $\text{cm}^{-1}$ . Posteriormente, se señalaron las principales bandas y se cotejaron con tablas para caracterizar los grupos funcionales e identificar arcillas, según lo reportado por White y Roth (1986).

#### **6.6. Difracción de rayos X.**

Para el análisis de difracción de rayos X se saturó la muestra con  $\text{MgCl}_2$  y  $\text{Mg}(\text{OAc})_2$  1 M. El espectro se adquirió en polvo desorientado de  $2\theta = 3^\circ$  a  $2\theta = 33^\circ$  y agregado orientado; agregado orientado saturando con etilenglicol, a  $300^\circ\text{C}$  y a  $500^\circ\text{C}$  de  $2\theta = 3^\circ$  a  $2\theta = 16^\circ$ , se utilizó un aparato General Electric XRD 4 con tubo de Cu, radiación de 1.5405 Å y tensión máxima de 40 kv. La interpretación se hizo con base en los valores  $d(hkl)$  Å y cotejando con tablas y difractogramas publicados. (Brown, 1972; Moore y Reynolds, 1989).

#### **6.7. Microscopía electrónica de barrido y microscopía electrónica de transmisión .**

La preparación de las muestras para su observación al microscopio electrónico de barrido Jeol JSM 5200 con tensión máxima de 25 kv, resolución máxima de 5.5 nm, amplificación máxima de 200,000 aumentos y velocidad de barrido de 10 segundos para recorrer la pantalla y al tomar fotografía de 90 segundos, se realizó agregando una gota de material en el portamuestras que se deshidrató mediante tratamientos sucesivos con acetona al 15, 30, 50, 70, 95 y 100% v:v. Ya seca se recubrió con oro utilizando a través del sistema

de sombreado Anatec modelo Humer VI-A, con rango de vacío máximo de  $10^{-3}$  atmosferas y presión de 40 mm de mercurio durante 3 minutos.

Las muestras que se observaron en MET se prepararon de igual forma que las de MEB, excepto que no se deshidrataron y se recubrieron con carbón. El MET utilizado fue Jeol 100CX con resolución de  $16\text{\AA}$ , amplificación máxima de 250,000 y con equipo ASID-4D unido a un espectrómetro de dispersión de energía Rayos X Kevex 7000.

Los AH se observaron después de dializarlos. Las microfotografías de barrido y de transmisión se identificaron a través de su morfología (Dixon, 1989).

#### **6.8. Espectroscopía de emisión de plasma.**

Los diferentes metales de las arcillas se cuantificaron con el aparato de emisión de plasma Perkin Elmer modelo 2000, se hizo una digestión de 1 g de muestra con  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HClO}_4$  concentrados en baño de arena, el material se dejó casi a sequedad y se filtró con agua destilada en un matraz aforado de 25 ml.

Para la cuantificación de los metales en los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, se colocó un gramo en un matraz de bola de 100 ml, se agregaron 3 ml de agua destilada, 7.5 ml de  $\text{HCl}$  6 M y 2.5 ml de  $\text{HNO}_3$  concentrado. Se dejaron reposar 24 h, se adicionaron 30 ml más de agua destilada y se colocaron a reflujo por 2 h, permitiendo su enfriamiento a través del uso de un condensador de 40 cm, la solución se filtró y aforó en matraces de 100 ml con papel resistente al ácido y una porosidad de 0.4 a  $1.1\ \mu\text{m}$  (Alloway, 1990).

### **6.9. Evaluación del contenido total de azúcares (hidrolizables).**

Se seleccionaron algunas muestras fraccionadas y de suelo total para valorar los azúcares provenientes de los polisacáridos totales.

Para obtener el hidrolizado de polisacáridos totales se pesó 1 g de suelo ó 0.1 g para arcillas y CAH, se colocaron en matraces erlenmeyer y se adicionaron 4.2 ml de  $H_2SO_4$  al 72%, además de 100 ml de agua destilada, se cubrieron con vasos de precipitado de vidrio y se sometieron a la acción de una autoclave durante 1 h a 124 °C, se enfriaron, filtraron con papel Wathman # 1 y se diluyeron a 250 ml y para obtener el hidrolizado con polisacáridos lábiles se siguió el mismo procedimiento, excepto que no se agregó  $H_2SO_4$ .

De los hidrolizado filtrados, se tomaron alícuotas de 1 ml y se valoraron por el método de la antrona, que consiste en agregar 10 ml de antrona al 0.2% disuelta en  $H_2SO_4$ , la extinción óptica de las soluciones se determinó a 625 nm, se comparó con una curva estandar de glucosa (Brink et., al 1959).

Se hicieron las transformaciones necesarias para expresar el resultado en g de glucosa/ g de suelo.

Se realizó análisis de microsonda al hidrolizado de los polisacáridos totales después de filtrarlo, pasarlo por resina XAD-8 y liofilizarlo.

### **6.10. Análisis de la capa blanca.**

La capa blanca, se caracterizó micomorfológicamente en MEB y microscopio óptico, usando este último se cuantificó el número de diatomeas aplicando la técnica de Johanson donde 1 g de suelo se lavó con  $HNO_3$  y  $K_2Cr_2O_7$ . La cuantificación se hace con

base en diluciones específicas a partir del gramo de muestra tratado. Los portamuestras se prepararon con 0.5 ml a una concentración de 0.0025 g, se observaron a un aumento de 100 y se contaron 9 transectos de 18 mm. Los cálculos se hicieron tomando en cuenta la fórmula:  $\text{Diatomeas/g suelo} = \frac{CL}{STW}$ , donde W= Amplitud del campo, L= Longitud del transecto, S= gramos de suelo, T= No. de transectos examinados, C= Frústulas contadas.

#### 6.11. Bioensayo.

Para probar el efecto de los CAH y arcillas en el crecimiento inicial de la planta *Antirrhinum majus* "Perrito", se hizo un ensayo en invernadero, en macetas con una capacidad de 40g y donde se sembraron 5 semillas en cada una. Se trabajó con un diseño de bloques incompletos, de  $5 \times 5$ , con distribución completamente al azar (Figura No. 6), donde se aplicaron 2 dosis principales 30 y 80 mg kg<sup>-1</sup>.

Los tratamientos probados fueron 25 incluyendo al testigo, se hicieron 4 repeticiones por lo cual se tuvieron 100 unidades experimentales.

Los tratamientos se codificaron como sigue :

Tratamiento No.1: 30 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa superficial calicata ácida.

Tratamiento No.2 : 30 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa blanca calicata ácida.

Tratamiento No.3.: 30 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa profunda calicata ácida.

Tratamiento No.4 : 80 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa superficial calicata ácida.

Tratamiento No.5 : 80 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa blanca calicata ácida.

Tratamiento No.6 : 80 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa profunda calicata ácida.

Tratamiento No.7 : 30 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa superficial calicata alcalina.

Tratamiento No.8 : 30 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa blanca calicata alcalina.

Tratamiento No.9 : 30 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa profunda calicata alcalina.

**Tratamiento No.10 : 80 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa superficial calicata alcalina.**

**Tratamiento No.11 : 80 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa blanca calicata alcalina.**

**Tratamiento No.12 : 80 mg kg<sup>-1</sup> CAH de la capa profunda calicata alcalina.**

**Tratamiento No.13 : 30 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa superficial calicata ácida.**

**Tratamiento No. 14 : 30 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa blanca calicata ácida.**

**Tratamiento No. 15 : 30 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa profunda calicata ácida.**

**Tratamiento No. 16 : 80 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa superficial calicata ácida.**

**Tratamiento No. 17 : 80 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa blanca calicata ácida.**

**Tratamiento No. 18 : 80 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa profunda calicata ácida.**

**Tratamiento No. 19 : 30 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa superficial calicata alcalina.**

**Tratamiento No. 20 : 30 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa blanca calicata alcalina.**

**Tratamiento No. 21 : 30 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa profunda calicata alcalina.**

**Tratamiento No. 22 : 80 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa superficial calicata alcalina.**

**Tratamiento No. 23 : 80 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa blanca calicata alcalina.**

**Tratamiento No. 24. 80 mg kg<sup>-1</sup> arcilla de la capa profunda calicata alcalina.**

**Tratamiento No. 25 : Tratamiento testigo con agrolita.**

Después de 120 días de la siembra de *A. majus*, se cuantificó el número de semillas germinadas, se midió el tallo y la raíz y se registró el número de plantas que sobrevivieron, así como el peso fresco y número de hojas después de su crecimiento se hizo prueba de varianza y de Tukey con base en el diseño experimental.

Aimismo se evaluó el efecto de factores simples como el pH, presencia de humus o materia orgánica, profundidad de la que se extrajo la arcilla o CAH y la dosis, así como las

**interacciones de primer y segundo orden, utilizando el programa SAS con análisis de varianza y prueba de Tukey, para un diseño factorial de  $2 \times 2 \times 2 \times 3$ .**



11	16	6	1	21	A
23	3	8	13	18	C
19	9	24	14	4	D
17	7	22	12	2	B
20	10	5	25	15	E

19	18	20	16	17	D
24	22	25	23	21	E
14	15	11	12	13	C
2	1	4	5	3	A
8	9	7	10	6	B

47

4Y

FIGURA No.6. Distribución de los tratamientos en un diseño simple 5x5 con bloques incompletos y cuatro repeticiones.

3X

4	5	2	1	3	A
25	22	24	21	23	E
11	15	13	14	12	C
20	17	18	16	19	D
8	7	6	9	10	B

1X

A	11	16	1	6	21
C	18	13	3	23	8
E	25	5	20	15	10
B	12	17	7	22	2
D	14	4	9	19	24

2Y

## **7. DISCUSION DE RESULTADOS.**

### **7.1. Características de Campo.**

Los suelos de las chinampas de San Gregorio Atlapulco (C56), San Luis Tlaxiátemalco (C63) y Tláhuac (C69) se clasificaron como Antroposoles o Antrosoles (Rozanov, 1990; Aguilera et al., 1987-1994), debido a su tipo de formación de origen antrópico, al manejo agrícola continuo y a la morfología no diferenciada en horizontes, por ello se denominaron calicatas las excavaciones hechas en el suelo para recolectar las muestras.

El muestreo de las calicatas C56 y C63 se hizo en marzo de 1992, mientras que el de la C69 se hizo en abril del mismo año. Las características isohúmicas dentro del perfil o calicata definieron la ausencia de diferenciación en los horizontes o capas, por lo que se realizó medición de profundidad en centímetros.

La capa superficial analizada se ubicó dentro de los 10 a 20 cm, se decidió estudiarla por ser parte de la capa arable y estar muy relacionada con la producción de la mayoría de las hortalizas cultivadas, en este caso en el suelo donde se ubicó la calicata C56 se encontró espinaca (*Spinacia oleracea*), mientras que en las chinampas donde se muestrearon las calicatas C63 y C69 se cultiva maíz (*Zea mays*).

La capa blanca se colectó con la finalidad de investigar su constitución, pues diversos análisis hechos en el Laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias de la UNAM, lugar donde se realizó este trabajo, mostraron características especiales diferentes al resto de las capas de la calicata, tales como su color más claro, su baja densidad aparente, su granulometría con predominio de la fracción limosa y su menor concentración de iones salinos principalmente, en el caso del suelo de San Gregorio (C 56) se encontró una franja

blanca muy pequeña de 140 a 142 cm; en la chinampa de San Luis Tlaxialtemalco (C 63) el espesor de la capa blanca fue muy superior, se encontró de los 80 a 140 cm y en la calicata C69 de Tláhuac se localizó de 86 a 186 cm, de los estratos de las capas blancas de ambas calicatas se seleccionaron para su estudio los primeros 10 cm.

La capa profunda localizada entre los 190-200 cm en las calicatas C56 y C69 y en la C63 de 180-190 se estudió porque reciben materiales que se lixivian de la parte superficial del suelo, además de que también deben existir movimientos laterales del agua por su cercanía con el manto freático, por lo que en su dinámica influyen las características del agua del lago. Las propiedades de cada una de estas capas sugieren que existen procesos edáficos diferentes en los que participan la materia orgánica, los ciclos biogeoquímicos y la actividad microbiológica.

Las descripciones de las calicatas en campo mostraron características de color, textura y pH que coincidieron con lo realizado en laboratorio (Tablas No. 1, 17 y 33); el color de las capas de las chinampas se determinó en húmedo, puesto que los suelos se encontraron bajo esas condiciones.

En la calicata C56 la capa superficial fue gris 7.5 YR 5/0, la capa blanca gris claro 7.5 YR 7/0 y la capa profunda negra 7.5 YR 2/0. En las calicatas C63 y C69 el color de la capa superficial fue negro (7.5 YR 2/0) y los encontrados en capas blanca y profunda grises (7.5 YR 6/0, 7.5 YR 4/0), igual que se encontró durante las determinaciones en laboratorio del color en húmedo (Tablas No. 1, 17 y 33).

La textura definida en la calicata (C 56) fue migajón arcillosa en la capa superficial y en las capas blanca y profunda migajón arcillo-limosa; en toda la calicata C63 y en las

capas blanca y profunda de la calicata C69 se encontraron texturas tipo franco, la capa superficial de la C 69 fue migajón limosa.

El pH determinado con papel indicador mostró que en la calicata C56 se encontraron rangos de 4 a 6, en la C63 fueron neutros y en la C69 hubo valores alcalinos cercanos a 10.

En todas las calicatas la plasticidad y adhesividad fueron ligeras en las capas superficiales y profundas mientras que en la capa blanca no se presentó ninguna de estas características, lo que se asoció con los contenidos de materia orgánica y arcilla (Tablas No. 1, 17 y 33).

Las diferentes calicatas mostraron características granulares en las capas superficiales y blancas, mientras que en las profundas se presentó un carácter masivo atribuido a la compactación.

Las consistencias determinadas en húmedo fueron sueltas en las capas superficiales, muy friables en las capas blancas y friables en las capas profundas, lo que se explica por la influencia del laboreo en la capa superficial, la composición ligera y poco resistente de la capa blanca y la compactación de la capa profunda .

En las capas superficiales y profundas el número de poros muy finos, finos y medianos se situó dentro de rangos frecuentes de 50 a 200 por  $\text{dm}^2$  y los poros gruesos fueron pocos de 1 a 50 por  $\text{dm}^2$ , mientras que en la capa blanca solo se presentaron poros frecuentes muy finos y finos, lo que se relacionó con el porcentaje de material orgánico, pues el número de poros es mayor en capas con alto contenido de materia orgánica (Buckman y Brady, 1977) (Tablas No. 1, 17 y 33).

La permeabilidad encontrada a lo largo de todas las calicatas varió de lenta a moderada y se atribuyó a la saturación del material edáfico con agua que originó dispersión, así como a la presencia de materiales finos arcillosos y en las capas profundas además a la compactación generada por el peso del suelo suprayacente.

Finalmente, el número de raíces se asoció a la capa arable pues en estas fue donde se encontró el mayor número de ellas, siendo abundantes (de 100 a 500 por 3 dm<sup>2</sup>) las raíces finas (menos de 1 mm de diámetro), comunes (de 10 a 100 por 3 dm<sup>2</sup>) las delgadas (de 1 a 3 mm de diámetro) y pocas (de 5 a 10 por dm<sup>2</sup>) las de tamaño medio (de 3 a 10 mm de diámetro). En la capa blanca se encontraron pocas raíces finas y en la capa profunda no se detectaron (Cuanalo, 1990).

## **7.2. Suelo de San Gregorio Atlapulco.**

### **7.2.1. Características físicas y químicas.**

#### **7.2.1.1. Color.**

Los colores de esta calicata se enmarcan dentro del color espectral denominado (hue) 7.5 YR según el código Munsell tanto en material edáfico seco como en húmedo. Las capas superficial y profunda mostraron grados más oscuros (negro o gris), que la denominada capa blanca que conservó el gris claro en seco y el gris oscuro en húmedo (Tabla No. 1).

Los colores oscuros en el suelo frecuentemente han sido asociados con elevados contenidos en materia orgánica y buena fertilidad, sin embargo también han sido relacionados con material sulfuroso, se ha señalado que estos constituyentes poseen bajos valores en chroma; en este suelo de San Gregorio se mantuvo dentro del valor cero y en diversas publicaciones de la zona chinampera en la mayoría de los casos los valores del chroma variaron de 0 a 1 (Mercado, 1993; Reyes, 1992).

Es importante a su vez señalar que el chroma cuando se conserva dentro del valor de cero implica alta pureza relativa de la longitud de onda dominante, pues se sabe que cuanto menor es el valor del chroma aumenta la proporción de luz blanca (Munsell, 1992; Aguilera, 1989).

Por otro lado se ha visto que el material sulfuroso de origen mineral siempre conserva chromas Munsell de 1 o menos y los de origen orgánico son de chromas altos (más de 2). Por lo tanto el color oscuro en el caso del suelo analizado y en general de la zona chinampera, se atribuyó al alto contenido de materia orgánica. (Fanning et al., 1993 ).

También se ha llegado a la conclusión de que altos porcentajes de arena (50 a 100%) pueden sobreestimar el color oscuro que denota en muchos casos el contenido de materia orgánica. Este evidentemente no es el caso, pues la muestra que conservó un mayor porcentaje de materia orgánica tuvo el color más oscuro y el rango menor de *value*. (Tabla No. 1, Gráfica No. 1).

Se han realizado cuantificaciones de materia orgánica con base en los colores, muestras con valores 10YR 2/1 prácticamente negro presentaron contenidos mayores de 50 g kg<sup>-1</sup>, mientras que rangos 10YR 2/2 (pardo muy oscuro), 3/1 gris muy oscuro, 3/2 pardo grisáceo muy oscuro y 3/3 pardo oscuro tuvieron de 30 a 50 g kg<sup>-1</sup> y muestras con los restantes colores encontrados en la carta 10YR, se asociaron a contenidos de materia orgánica menores de 30 g kg<sup>-1</sup> (Schulze et al., 1993).

En cuanto al *value* del color de las tablas Munsell se ha encontrado que este disminuye linealmente conforme incrementa el contenido de materia orgánica, lo cual se cumplió parcialmente en las determinaciones de color en seco, pues las capas superficial y profunda que tuvieron mayores porcentajes de materia orgánica presentaron valores de 2 a 5 y las de menores porcentajes rangos de 7 .

A su vez también se ha analizado como influyen las diversas fracciones de la materia orgánica sobre el color oscuro que producen y se concluyó que la fracción de AH produce el mayor porcentaje de color negro, pues los AF poseen colores pardos amarillentos, ello se corroboró en la Tabla No. 5 donde la capa profunda que fue la de color más oscuro, mostró los más altos porcentajes de carbono en la fracción de AH (Schulze et al., 1993).

En general, la mayoría de las propiedades del suelo influyen sobre su color, las más importantes son material parental, geomorfología e hidrología. La roca de origen a su vez influye sobre la textura del suelo, por lo tanto sobre el movimiento y almacenamiento de agua que modifica sus condiciones de óxido-reducción. Un ejemplo de esta influencia es el caso de los materiales félsicos que promueven la existencia de suelos bien drenados de colores amarillos o rojos (10 YR a 2.5 YR), mientras que los máficos involucran óptimos desarrollos edáficos y colores dentro del rojo oscuro 10 YR (Richardson y Daniels, 1993).

Los materiales parentales asociados con áreas geológicas cercanas a la zona chinampera son andesitas y basaltos que se originaron de rocas volcánicas durante los períodos del terciario superior, cuaternario o cretácico que abarcan un tiempo de 15 a 50 millones de años, así como de materiales más jóvenes provenientes de la Sierra Chichinautzin de una edad de 700 mil años, su geoforma por lo general es plana con pendientes de 1 a 2%, con altitudes de 2240 msnm..

*Values* altos y chromas bajos se asocian a pobres contenidos de óxidos de hierro (Richardson y Daniels, 1993), en el suelo de San Gregorio Atlapulco se encontró la relación de estas características de color, sin embargo los altos contenidos de hierro (Tabla No.4), asociados a la oxigenación continua dada al menos en capas superficiales, por la remoción de materiales edáficos a través del uso del arado e incorporación de materia orgánica desembocan en la presencia abundante de óxidos de hierro.

Los colores en húmedo presentaron tendencias a mayores oscurecimientos si se compara con los colores en seco, pues como se sabe la humedad origina la disminución en el parámetro value de la notación Munsell, en los resultados determinados disminuyó 3



unidades en las capas superficiales y blancas, mientras que la profunda permaneció igual (Tabla No.1).

#### **7.2.1.2. Textura.**

La textura del suelo fue diferente en las tres capas analizadas de esta calicata (Tabla No.1), el mayor porcentaje de arcilla se encontró en la capa superficial, el menor en la capa blanca y el intermedio en la capa profunda. El contenido de limo total fue muy parecido a lo largo de toda la calicata, destacando la presencia dominante del limo medio, sobre todo en la capa profunda, mientras que la fracción arenosa presenta porcentajes mayores en la capa blanca, intermedia en la capa superficial y baja en la capa profunda (Gráfica No.1).

#### **7.2.1.3. Densidad Aparente y Real.**

Los valores de la densidad real fueron característicos de suelos orgánicos, hubo disminuciones conforme incrementó la profundidad, mientras que la densidad aparente permaneció más alta en la capa superficial, pues su contenido de materia orgánica fue mayor que el encontrado en la capa blanca. Los menores valores de densidad aparente se encontraron en la capa profunda, pues esta capa se caracterizó por su alto contenido de materia orgánica y porosidad.(Tabla No.1).

La densidad aparente encontrada en la capa blanca se atribuyó a su constitución predominante a base de frústulas de diatomeas (Tabla No.10) las que en su esqueleto poseen alta concentración de sílice

El porcentaje de porosidad se mantuvo en rangos altos, siendo generalmente mayor del 50% lo que teóricamente implicó condiciones óptimas de airación radicular, por lo tanto obtención de nutrientes del suelo, crecimiento y desarrollo de los cultivos óptimos.

Hubo mayores porcentajes de porosidad en capas blancas y profundas, el menor se encontró en la superficial (Tabla No.1).

En el suelo de San Gregorio Atlapulco los principales minerales primarios definidos por difracción de rayos X (Gráficas No. 12 y 13 ) fueron los feldspatos, que tienen densidades de 2.5 a 2.6 g cm<sup>-3</sup> así como micas con valores de 3.02 a 3.12 g cm<sup>-3</sup>, lo que influyó en parte los resultados encontrados en la densidad real de las muestras analizadas, sin embargo el predominio de materia orgánica fue el más significativo en la determinación.

#### **7.2.1.4. Reacción del suelo.**

Los valores de pH determinados en suspensión suelo:agua 1:5 v:v de las muestras de suelo son ácidos, con incrementos de áidez al aumentar la profundidad (Tabla No. 1), lo que se explica de acuerdo con la formación de las chinampas, pues se incorporaron al suelo diversas capas de mejoradores orgánicos entre los que se incluye estiércol, composta, residuos vegetales de cosecha, lodo y vegetación acuática extraída del lago, principalmente lirio acuático, todo este material va quedando en capas que son enterradas por la nueva acumulación de materiales orgánicos aplicados, lo que ha generado a lo largo del tiempo capas de diferentes características. Y si se toma en cuenta que el tiempo que ha transcurrido desde la construcción de las chinampas más antiguas data aproximadamente desde los 200 años A.C ó 800 A.C (Jiménez, 1990), este proceso de formación promueve una considerable variabilidad dependiente del manejo agrícola que se dió en épocas

determinadas al suelo, influyendo además el cultivo implantado, la fertilización realizada durante los últimos 10 años anteriores (información proporcionada por los chinamperos), al muestreo y la incorporación de material orgánico.

Así, la aplicación de urea y superfosfato simple o triple que han sido señalados dentro del uso agrícola del suelo de San Gregorio Atlapulco, pudo originar parte de la acidez del suelo, pues los fertilizantes nitrogenados como la urea producen transformaciones de amoníaco a nitrato y siempre se acompañan de producción de ácido nítrico. Aún cuando el efecto inicial del amoníaco sobre el terreno es elevar el pH, el último es un descenso de su valor (Tisdale, 1987). Sin embargo el material parental arrastrado de las áreas montañosas circundantes estableció de manera más determinante el carácter ácido de los suelos chinamperos, el cual se ha modificado por el mal manejo antrópico.

Los valores de pH relación 1:5 en agua fueron muy semejantes a los de la pasta de saturación (Tablas No.1 y No. 3): hubo variaciones de 0.1 a 0.3 unidades, lo que se explicó por que en este suelo no hubo iones salinos que se solubilizaran y modificaran el pH aunque la determinación del pH se realizara bajo diferentes proporciones agua:suelo.

#### **7.2.1.5. Materia orgánica, carbono, nitrógeno.**

Los porcentajes de materia orgánica del orden de 9 a 31% fueron más altos en la capa profunda, menores en las capas blancas e intermedias en las capas superficiales, ello se explica por lo mencionado, en cuanto a manejo agrícola. Asimismo los máximos contenidos de materia orgánica y arcilla estuvieron relacionados con la mayor capacidad de intercambio catiónico total (CICT) (Tabla No. 1 y 2, Gráfica No.1)

Los contenidos de carbono y nitrógeno en suelos son indicativos de la actividad bioquímica de la materia orgánica asociada a la fisiología microbiana. Por ello es importante fraccionar el suelo en tamaños granulométricos y caracterizar los contenidos de carbono y nitrógeno que constituyen cada una de las fracciones, pues se pueden establecer las bases de la dinámica de los ciclos edáficos de esos elementos.

Las relaciones C/N son utilizadas para definir indirectamente la fertilidad del suelo, debido a que el nitrógeno suele ser el factor limitante para el desarrollo de la microflora y de su actividad dependen las transformaciones de la materia orgánica, entre estas se encuentra la mineralización, entendida como la obtención de nitrógeno disponible y la humificación o complejación química de las moléculas orgánicas edáficas que originan difícil disponibilidad ya que ocurren lentas degradaciones. Si hay altos contenidos de nitrógeno, que implican bajas relaciones C:N, se producen mayores mineralizaciones mientras que bajos contenidos de nitrógeno y amplias relaciones C:N se asocian a lentas degradaciones de la materia orgánica, (Alexander,1980).

Sin embargo estos índices son aplicables a horizontes superficiales de suelos terrestres no hidromorfos, puesto que los de características hidromorfas, los sedimentos marinos y materiales transportados tienen relaciones C/N más bajas de lo que correspondería a la actividad biológica, lo que se asocia a la presencia de proteínas acumuladas por anaerobiosis. Los materiales fósiles también presentan relaciones C/N bajas, pues su contenido de carbono no se intercambia con el de la atmósfera, encontrándose proteínas que no sufren alteración. Asimismo los horizontes profundos de suelos agrícolas con bajo porcentaje de carbono, pueden tener relaciones C/N muy bajas,

por el arrastre de nitratos. Cuando es menor de 7, se asegura, que el nitrógeno no es orgánico, sino mineral acumulado.

Esta dinámica generada alrededor del carbono y nitrógeno se asocia a la actividad biológica y a factores edáficos que influyen o modifican la dinámica biofísicoquímica de un suelo como temperatura, pH, humedad y aireación, por lo que es importante analizar el suelo y cada una de las fracciones provenientes de calcatas con condiciones distintas de pH y contaminación sódico-salina o metálica para mejorar su aprovechamiento.

Los máximos contenidos de carbono y nitrógeno en el suelo se conservaron en la parte más profunda de la chinampa, la zona intermedia (capa blanca) mostró los menores valores y la capa superficial muestra porcentajes intermedios (Tabla No. 1).

En toda la chinampa las relaciones C/N del suelo se encontraron comprendidas en los rangos típicos agrícolas (Tabla No.2), esto definió la transformación óptima en la degradación de material orgánico, así por un lado hubo adecuada disponibilidad de nutrientes para los cultivos y por otro se promovió la estabilidad del carbono al ocurrir polimerizaciones y formarse sustancias húmicas.

En la capa superficial los contenidos de nitrógeno del suelo fueron de valores altos (Tabla No.2), por el manejo agrícola que tienen las chinampas que indujo adecuada oxigenación y óptima actividad microbiológica, mientras que en las capas profundas el alto porcentaje de nitrógeno está en relación con la menor oxigenación, lo que implicó actividad biológica disminuida; además hay que tener en cuenta la cantidad, forma de aplicación y estado de transformación del material orgánico incorporado al suelo durante diferentes periodos de tiempo, pues se introducen grandes dosis de estiércoles y lodo que varían de espesores de 20 cm a 1 m. Tanto la actividad microbiana atenuada como el exceso de

material orgánico existente promovieron la inmovilización y contribuyeron a la acumulación de nitrógeno y carbono en esta capa.

La capa blanca, mostró menores porcentajes de nitrógeno que las capas restantes (Tabla No.2) posiblemente debido a su origen, en el que se supone participaron diferentes períodos de sequía y se piensa que surgió como producto de la acumulación de algas existentes y dominantes en el lago que fueron quedando cada vez que se evaporaba de manera significativa el agua del lago, de tal forma que entre las capas oscuras predominantemente orgánicas, quedaron capas de colores claros.

Esta hipótesis se basa en que la zona de San Gregorio Atlapulco posee canales de agua más caudalosos que los de Tláhuac o San Luis Tlaxialtemalco, pues en estas áreas hay numerosos canales secos. Por ello la capa blanca de San Gregorio Atlapulco fue de un espesor pequeño (2 cm), mientras que las de Tláhuac y San Luis Tlaxialtemalco fueron de hasta 1m de profundidad.

Este proceso de características medioambientales especiales relacionadas principalmente con la sequía generó menor actividad microbiana, por tanto el nitrógeno de esta capa provino tanto del material orgánico cercano que se mezcló por el continuo laboreo agrícola como del material ficológico.

La mayor relación C/N en la capa blanca (Tabla No.2) se debió a su vez a la mineralización más lenta por la menor población y actividad microbiana en climas secos, lo que propició la polimerización o humificación, sin embargo esta última depende obviamente del contenido y composición del material orgánico (Duchaufour, 1984), por lo que las capas profunda y superficial presentaron grados de humificación mayores (Tabla No. 5).

#### 7.2.1.6. Fósforo.

En el suelo los contenidos de fósforo absorbible (Tabla No.2) conservan la misma relación que el carbono y nitrógeno, pues son mayores en la capa profunda y menores en la capa blanca, mientras que la capa superficial muestra valores intermedios, lo que se atribuye al porcentaje de arcilla, pues la fijación de P se asocia frecuentemente a la cantidad de arcilla presente en el suelo (Tisdale, 1987) (Tablas No. 1 y 2, Gráfica No.1) y al contenido de materia orgánica, debido a que el fósforo se inmoviliza en el complejo arcilla humus, la constitución química de diversos compuestos fosforados proviene principalmente de estiércoles, que poseen altos contenidos de fósforo de 25 a 35 ppm (Reyes, 1992).

Con base en el método de Bray I se encontraron altos contenidos de fósforo en la calicata que se asociaron a pobres concentraciones de potasio, lo cual coincidió con lo reportado por Kilmer et al., (1968).

Los valores de concentración de P (0.014 a 0.035 %) de esta chinampa equivalentes a 120.40 y 252 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> fueron semejantes a los encontrados en trabajos realizados en la zona (Reyes, 1992; Mercado, 1993).

Es importante señalar que la disponibilidad de fósforo se asocia a la reacción del suelo, la máxima se encuentra a valores de pH entre 5.5 y 7 (Tisdale, 1987), concentraciones encontradas en la capa superficial de esta calicata de San Gregorio y que es una de las razones que favoreció el desarrollo de la planta *A. majus* (Tabla No. 49) al utilizar arcilla de esta capa y de este suelo.

#### **7.2.1.7. Iones intercambiables.**

Los contenidos de iones intercambiables en todas las capas mostraron mayores concentraciones de magnesio con respecto a las de calcio, las relaciones Ca:Mg fueron de 0.5 en las capas superficial y blanca (Tabla No.2), por tanto el magnesio duplica el contenido en calcio, mientras que en la capa profunda es de 0.82, con menor diferencia por lo tanto entre estos cationes. Estas características es importante analizarlas, pues la deficiencia de calcio en plantas puede inducirse por desequilibrios entre los contenidos de calcio y magnesio en el suelo (Cajuste, 1977). La presencia abundante de magnesio se explica por el material geológico circundante a la zona chinampera constituido primordialmente de andesitas, basaltos, traquiandesitas, dacitas, lutitas y riolitas ricas en minerales ferromagnesianos (Mooser, 1963), que promovieron en ambientes ricos en magnesio la formación de montmorillonita, (Dixon, 1989). También es importante señalar que el magnesio se encuentra en diversos tejidos vegetales que contengan clorofila, por ello en la chinampa también pudo originarse del material orgánico proveniente de residuos de cosecha donde se incorporan tejidos vegetales, así como abundantes capas de lirio acuático que se extraen del lago y se entierran en el suelo.

En las relaciones Ca:K, (Tabla No.2) se observó que el calcio es dominante sobre el potasio, variando alrededor de 50 veces más calcio que potasio en las capas superficial y profunda, mientras que en la capa blanca osciló alrededor de 30.

Lo señalado por Kilmer et al., (1968) acerca del incremento de nitrógeno asociado a máximos porcentajes de calcio y magnesio así como a la disminución de potasio, se encontró parcialmente en los resultados de la calicata (Tabla No. 2), pues aunque se



observaron altos contenidos de nitrógeno, calcio y magnesio, aumenta ligeramente el porcentaje de potasio.

Puesto que los nitratos favorecen la acumulación de calcio y aumentan la relación Ca:K, así como también incrementan los contenidos de ácido oxálico, podría pensarse que esto ocurre en el suelo de San Gregorio (Tabla No. 2). Así también si la producción de maíz disminuyó 25% cuando la relación K:Ca cambió de 0.98 a 0.45, los valores de los índices (0.02 a 0.03) de la calicata calculados a partir de los contenidos de potasio y calcio fueron muy distantes lo que implicarían producciones muy pobres (Kilmer et al., 1968).

La presencia de calcio en el suelo se atribuyó a que se encuentra en varios constituyentes minerales del suelo como calcita, dolomita, feldespatos cálcicos o anfíboles, también puede provenir de cal o de yeso añadidos, prácticas que frecuentemente se realizan en la zona chinampera, del uso de materiales fertilizantes como el superfosfato simple o triple, en los que se incluye calcio asociado a otros nutrientes como el fósforo.

La distribución de calcio a lo largo de la calicata conservó la misma relación que el potasio y sodio, siendo mayor en la capa profunda, de valores intermedios en la capa superficial y de menores valores en la capa blanca, mientras que el magnesio estuvo más concentrado en capas superficiales, en valores intermedios en la capa profunda y en bajos contenidos en la capa blanca (Tabla No.2).

La distribución de los contenidos de potasio se atribuyó al mayor contenido de arcilla presente en las capas superficial y profunda (Tabla No.1 y 2, Gráfica No. 1) que promueve la fijación de este ión dentro de las celdas cristalinas. En los suelos, el contenido de potasio proviene de fertilizantes ó de la desintegración y alteración de rocas que contienen minerales potásicos como los feldespatos, moscovita o biotita y del vidrio

volcánico, por ello se deduce que estos materiales, aunque presentes en este suelo, (Gráficas No. 12 y No. 13) fueron poco significativos para la liberación de este nutrimento. Las concentraciones de sodio y calcio están muy relacionados con el porcentaje de materia orgánica, pues estos iones son abundantes en estiércoles y compostas, en general donde hay mayor contenido de materia orgánica se presentan incrementos de iones sodio y potasio.

El sodio intercambiable no plantea problemas de sodicidad en este suelo, pues los cálculos de los porcentajes de sodio intercambiable presentaron valores menores a 15, ésta relación se incrementa con el aumento de la profundidad (Tabla No.2), lo que se explica por la acumulación en la capa más profunda de sales provenientes de las capas superficiales, que son lixiviadas a través del agua de riego utilizada durante el cultivo y también porque el agua del lago asciende por capilaridad, la calidad es  $C_3S_1$ , condicionada por su contenido de sodio en cultivos tolerantes a este ión (Reyes, 1992).

Las relaciones  $K:Na$  con valores de 0.065 en capas superficiales, 0.068 en capas blancas y 0.05 en capas profundas (Tabla No.2), muestran que el  $Na$  es dominante respecto al potasio variando en capas superficiales y blancas de 15:1 y en capas profundas de 20:1, lo que implicó que el desarrollo de cultivos requiere de fertilizantes potásicos que puedan equilibrar los contenidos más altos de sodio como  $KCl$  o  $KNO_3$ , sin duda es más accesible el primero. Señalar la poca concentración de potasio en los suelos chinamperos es importante, pues interviene en el metabolismo de carbohidratos, de nitrógeno, síntesis de proteínas, regulación de actividades de varios micronutrientes, activación de algunas enzimas y en procesos fisiológicos como la apertura de estomas, fotosíntesis y respiración (Tisdale, 1987).

Es importante señalar que altas concentraciones de magnesio como las encontradas (Tabla No. 2) requieren más potasio para incrementar la producción de los cultivos. Elevados contenidos de calcio, magnesio o azufre disminuyen la concentración de potasio. Las condiciones físicas como humedad, temperatura, compactación, aereación y salinidad ejercen marcada influencia sobre el potasio; el exceso de humedad reduce la concentración de potasio e incrementa la relación  $(Ca + Mg)/K$  lo que se asocia con la disminución de la producción; en la calicata estas relaciones fueron muy altas, oscilando entre 95.45 y 155.17; la compactación reduce marcadamente el contenido de potasio e incrementa el de calcio y magnesio. Las condiciones óptimas de producción en maíz se asociaron a las siguientes relaciones  $K/Ca$  5.45,  $K/Mg$  3.21 y  $(Ca + Mg)/K$  0.49, contrastando con las de la chinampa; así por ejemplo, en la capa superficial se encontraron valores de 0.02, 0.009 y 155.17 respectivamente.

Altas concentraciones de sodio, calcio o magnesio fueron características de bajas producciones. Elevados contenidos de sodio hacen poco significativa la relación  $(Ca + Mg) /K$  pero pueden relacionarse a alta producción cuando los índices  $(Ca + Mg + Na) /K$  disminuyen; en esta chinampa fueron extremadamente altos hasta de 170. La relación  $Ca / (K + Na) = 0.7$  o cercanas al valor de 1 implican óptimas producciones; en la calicata oscilaron de 2.03- 3.16.

De acuerdo con los índices señalados que establecen la importancia del potasio, el suelo de San Gregorio presenta tendencia a producciones deficientes.

La CICT y los porcentajes de saturación de bases fueron elevados en este suelo, destacando los correspondientes a la capa profunda y la capa superficial (Tabla No.2) atribuible a sus mayores contenidos de materia orgánica y de arcilla.

### **7.2.1.8. Conductividad eléctrica y iones solubles.**

La conductividad eléctrica (CE) a lo largo de toda la calicata presentó valores cercanos a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , que denotan ausencia de problemas de salinidad provocados por sales solubles, aunque para cultivos sensibles como el frijol, estas características pueden disminuir su rendimiento (Richards, et al., 1985). Los iones solubles calcio, magnesio, potasio y sodio, muestran relaciones semejantes a los intercambiables, pues se concentran más en capas profundas y en orden decreciente se sitúan los contenidos de las capas superficial y blanca. Los aniones cloruro y bicarbonato también conservaron esta relación mientras que en el caso del sulfato se comprueba mayor contenido en la capa superficial y menor en la capa profunda, no se encontraron carbonatos en ninguna de las capas analizadas de esta calicata (Tabla No.3), lo que era de esperarse por el valor del pH de la solución del suelo.

De cualquier manera los niveles de estos aniones frecuentemente asociados a la presencia de sales contaminantes al igual que los del sodio soluble reflejados más evidentemente en la relación de adsorción de sodio que varió de 2 a 4% fueron escasos como para considerar que provocaran daños a cultivos.

La suma de cationes y aniones se encontró equilibrada tanto en la capa superficial como en la capa blanca, mientras que en la capa profunda la suma de cationes duplicó a la de aniones, esto se atribuyó al pH y a el contenido de materia orgánica mucho mayor que el de las capas restantes que incrementó el número de nutrientes o elementos catiónicos. (Tablas No. 1 y 3), así como a la probable presencia de boratos y nitratos que no se

determinaron, puesto que con base en la ley del equilibrio de masas cada carga positiva debe de ser compensada por una negativa (Cajuste, 1977).

Por otro lado, la menor concentración de cloruros, sulfatos y bicarbonatos en este suelo ácido (Tabla No.1), sin duda implica mejor actividad microbiológica, puesto que la formación de sales a base de estos aniones afecta el metabolismo de diversos microorganismos y altera los procesos de amonificación, nitrificación, fijación de nitrógeno y los ciclos biogeoquímicos (Echegaray, 1970).

Mezclas de concentraciones de sales como NaCl, CaCl<sub>2</sub> y MgCl<sub>2</sub> son menos agresivas en la reducción de la producción de cultivos que cuando sólo existe alguna de ellas (Kilmer et al., 1968).

#### **7.2.1.9. Metales totales.**

Los contenidos de metales totales encontrados en este suelo (Tabla No. 4) conservan relaciones acordes con los porcentajes de arcilla o materia orgánica (Tabla No.1) así, por ejemplo, el cobre y el zinc se encontraron en mayor concentración en la capa profunda, que presentaba los más altos niveles de material orgánico, mientras que el níquel, fierro, aluminio, cadmio, cromo y cobalto presentan valores más altos en la capa superficial, que incluye mayores porcentajes de arcilla. En general, la capa blanca se caracteriza por menores contenidos en todos los metales, pues sus porcentajes de materia orgánica y arcilla fueron inferiores al resto de las capas. Y también, se observó que los contenidos de cadmio, cromo y cobalto son bajos y muy parecidos en las tres capas analizadas, si bien son más semejantes entre la capa superficial y la profunda.

Conocer los contenidos totales de estos metales es importante, puesto que varios de ellos presentan el carácter de micronutrientes mientras que en altas concentraciones algunos pueden originar toxicidad.

En la calicata los contenidos de fierro fueron elevados, en suelos su concentración oscila desde  $200 \text{ mg kg}^{-1}$  hasta un 10 %, pues se encuentra formando parte estructural de óxidos, hidróxidos, diversos minerales primarios y arcillas. En estas concentraciones, no se considera que el fierro ocasione problemas de toxicidad a los cultivos (Tisdale, 1987). La actividad del  $\text{Fe}^{+3}$  en solución disminuye 1000 veces por cada unidad de incrementó en el pH, mientras que la de  $\text{Fe}^{+2}$  solamente 100 veces. A pH de 7.8 el  $\text{Fe}^{+3}$  y  $\text{Fe}^{+2}$  tienen una concentración igual de  $10^{-21} \text{ M}$  (Mordvedt et al., 1983).

Según la literatura el cobre y zinc se han asociado con los fosfatos, por esto al observar el Tabla No.2 se aprecia que es mayor el contenido de fósforo cuando hay altos porcentajes de materia orgánica y iones metálicos. Por otro lado, aunque se ha encontrado que el cobalto disminuye en presencia de altas concentraciones de humus y su solubilidad, igual que la mayoría de los metales, es mayor bajo valores de pH ácidos (Mordvedt et al., 1983), este efecto no se apreció en este suelo chinampero, pues hubo mayores concentraciones de cobalto en capas con más contenido de materia orgánica.

El zinc a valores de pH por debajo de 7.7 conserva un predominio de  $\text{Zn}^{+2}$  mientras que a valores superiores es mayor el  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ . A pH 5, la concentración de  $\text{Zn}^{+2}$  en solución es de aproximadamente  $10^{-4} \text{ M}$  ( $6.5 \text{ mg kg}^{-1}$ ) y a valores de pH 8 es de  $10^{-10} \text{ M}$  (0.007 ppb). La solubilidad del  $\text{Zn}^{+2}$  es altamente dependiente del pH y disminuye 100 veces por cada unidad de incremento del pH (Mordvedt, 1983).

A valores de pH por debajo de 7.3, predomina el  $\text{Cu}^{+2}$ , mientras que valores superiores promueven la presencia dominante de  $\text{CuOH}^+$ ; a pH de 5 hay una solubilidad de  $\text{Cu}^{+2}$  de  $10^{-7} M$  y a pH 8 de  $10^{-14} M$ ; mientras que el  $\text{CuOH}^+$  bajo pH de 5 se solubiliza  $10^{-10} M$  y a pH 8  $10^{-12} M$  (Mordvedt, 1983).

La alta movilidad del zinc y cobre fue sin duda otro aspecto que contribuyó a la mayor concentración de estos metales en la profundidad del suelo. Asimismo, su afinidad por la materia orgánica es notoria, como se observa en los contenidos de metales encontrados en las fracciones orgánicas (Tabla No.8) y que se discuten posteriormente en la Sección 7.2.2.5.

La toxicidad probable por los contenidos de estos metales se presentó únicamente en el caso del cadmio y el aluminio, este último pudo disminuir su efecto por el alto contenido de materia orgánica, lo que ocasionó quelaciones que promovieron una disponibilidad gradual hacia la planta, ya que por la formación de complejos organominerales pudo actuar como agente amortiguador. Los efectos tóxicos ocasionados por aluminio no se observaron en las raíces de la planta *A. majus*, (Tabla No. 51), pues se ha descrito que promueve la formación de raíces cortas y delgadas, ya que el Al se acumula en las raíces y se retiene en sus paredes celulares (Wild, 1988).

La solubilidad del  $\text{Al}^{+3}$  se presenta a valores de pH entre 5 y 6 la concentración varía de  $10^{-3} M$  a  $10^{-10} M$ , el  $\text{Al(OH)}_2^+$  es soluble a valores de pH de 3 hasta 8, la mayor solubilidad ( $10^{-6} M$ ) se da bajo el valor ácido y la menor ( $10^{-10} M$ ) en el alcalino, la forma  $\text{Al(OH)}_4$  se solubiliza de  $10^{-11} M$  a pH de 3.5 hasta  $10^{-6} M$  a valores de 8 (Wild, 1988).

La dinámica de interacción entre metales y material orgánico es frecuente en suelos y si se asocia a altos contenidos de materia orgánica, como ocurre en las chinampas, es más

compleja, por lo cual es menos probable el efecto de toxicidad de los metales cuando se encuentran en las concentraciones indicadas en el Tabla No.4.

Tabla No. 1 Características físicas y químicas del suelo de la chinampa de San Gregorio Atlapulco.

Muestra	Color en seco	Color en húmedo	DR, gcm <sup>-3</sup>	DA gcm <sup>-3</sup>	Porosidad	% Arena	% Limo fino	% Limo medio	% Limo grueso	% Limo total	% Arcilla	pH KCl 1:5	pH H <sub>2</sub> O 1:5	% M.O
C56 10-20 Capa superficial	7.5 YR 5/0 Gris	7.5 YR 2/0 Negro	1.81	0.56	69.06	23.8	7.1	26.2	4.9	38.3	37.8	5.8	6.1	14.9
C56140-142 Capa blanca	7.5 YR 7/0 Gris claro	7.5 YR 4/0 Gris oscuro	1.59	0.43	72.96	32.5	18.0	24.8	4.8	47.7	19.8	4.4	4.7	9.4
C56 190-200 Capa profunda	7.5 YR 2/0 Negro	7.5 YR 2/0 Negro	1.52	0.36	76.32	21.9	6.2	40.0	0.9	47.2	30.8	4.1	4.3	31.0

DR= densidad Real, DA= ensidad Aparente, MO = materia orgánica

Gráfica No. 1. Distribución granulométrica de muestras edáficas superficiales , intermedias y profundas del suelo de la chinampa de San Gregorio Atlapulco.

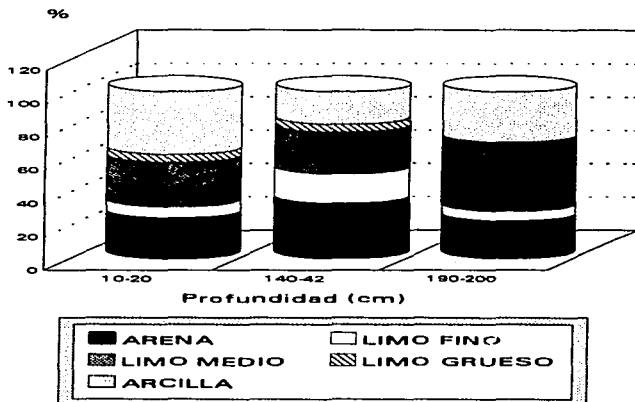




Tabla No. 2. Contenidos de carbono, nitrógeno, fósforo, iones intercambiables, CICT y sus diferentes relaciones, en el suelo de San Gregorio Atlapulco.

Muestra	cmol (+) kg <sup>-1</sup>								CICT	Ca:Mg	Ca:K	K:Na	PSI	PSB
	%C	%N	C:N	% P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>						
C56 10-20 Capa superficial	8.6	0.8	10.3	0.03	15.0	30.0	4.4	0.3	54.0	0.5	51.7	0.06	8.2	92.1
C56 140-142 Capa blanca	5.4	0.5	11.8	0.01	7.00	14.0	3.2	0.2	38.0	0.5	31.9	0.07	8.5	64.3
C56 190-200 Capa profunda	18.0	2.1	8.4	0.04	23.0	28.0	8.3	0.4	62.2	0.8	54.8	0.05	13.4	96.0

CICT = capacidad de intercambio catiónico total

PSI = porcentaje de Na intercambiable

PSB = porcentaje de saturación de bases

% C = porcentaje de carbono

% N = porcentaje de nitrógeno

% P = porcentaje de P

C:N = relación carbono/nitrógeno

Ca:Mg = relación Ca/Mg

Ca:K = relación Ca/K

K:Na = relación K/Na

Tabla No.3. Características químicas de la pasta de saturación, iones solubles, suma de cationes y aniones en el suelo de San Gregorio Atlapulco.

Muestra	cmol(+) L <sup>-1</sup>							cmol(+) L <sup>-1</sup>				
	CE dS m <sup>-1</sup>	pH pasta	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	RAS	Σ cationes
C56 10-20 Capa superficial	3.6	6.4	6.2	9.8	9.7	0.6	5.0	10.0	5.3	3.4	26.3	17.3
C56 140-142 Capa blanca	3.1	4.8	3.2	5.2	8.4	0.5	3.1	8.6	3.6	4.1	17.3	15.3
C56 190-200 Capa profunda	3.9	4.5	16.1	20.9	11.4	0.9	5.5	12.5	4.5	2.6	49.3	22.5

CE = conductividad eléctrica, RAS = relación de adsorción de Na, nd = no detectado.

Tabla No.4. Concentración de metales totales en el suelo de San Gregorio Atlapulco.

Muestra	mg kg <sup>-1</sup>							
	Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
C56 10-20 Capa superficial	17299	5	12460	4	4	26	71	35
C56 140-142 Capa blanca	324	1	3294	1	1	10	29	14
C56 190-200 Capa profunda	14125	4	7180	2	3	15	95	49

## **7.2.2. Evolución de las fracciones orgánicas.**

### **7.2.2.1. Fraccionamiento de la materia orgánica.**

Para el estudio de la evolución del material orgánico del suelo se tienen en cuenta los porcentajes de carbono existentes en cada fracción constituyente el humus; si hay mayores porcentajes de carbono en forma de AH o humina de insolubilización; la materia orgánica es más evolucionada que si el carbono se encuentra como en el caso forma de los AF y las huminas heredadas.

Asimismo, estudios más detallados basados en la aplicación de electroforesis y espectroscopía de IR permiten determinar con mayor precisión las características específicas de estas macroléculas constitutivas del humus, lo que permite definir la evolución orgánica del suelo. Dicha evolución depende de los factores medioambientales y de formación del suelo que implican actividades microbianas características. La dinámica de la materia orgánica condiciona, parte de la actividad biofísicoquímica del material edáfico, sobre todo en estos suelos de chinampas, donde es predominante la fracción orgánica.

En los suelos chinamperos estudiados intervienen tres factores importantes durante la formación y evolución del humus: la anaerobiosis, la contaminación sódica salina y los periodos de sequía o inundación. Cada uno de ellos interactúa con procesos edáficos y agrícolas específicos en las diferentes capas.

La superficie de la calicata es la más favorable para la transformación óptima, ya que los procesos de laboreo, así como la incorporación de mejoradores orgánicos, la actividad microbiana y la aireación, generan actividades bioquímicas propicias para la

mineralización y la humificación del material orgánico. Sin embargo el equilibrio se puede alterar cuando concurren períodos de intensa lluvia o se aplican riegos excesivos, pues se producen procesos de inundación y anaerobiosis propiciados por el mal drenaje del suelo. Y también contribuye el uso de aguas de riego de mala calidad ( $C_3S_1$ ), pues con el tiempo, generan problemas de salinidad y sodicidad como se aprecia en la calicata alcalina C69 de Tláhuac. Los problemas de contaminación salina afectan la actividad microbiana, promueven precipitaciones e inmovilización de fierro ferroso al asociarse con carbonatos o bicarbonatos, que impiden la evolución del humus, pues el fierro se ha asociado a la polimerización de fenoles, considerados como precursores de los constituyentes húmicos.

En la capa blanca intervienen procesos que aceleran la mineralización y puede originar hidromorfismo y anaerobiosis que impiden o atenuan la humificación. La presencia de altas concentraciones de sílice, aunada al menor contenido de fierro debieron influir en una menor polimerización de los precursores fenólicos; así también se encontró el menor contenido de carbono como corresponde al origen de esta capa a partir principalmente de las diatomeas y del material que se lixivió y mezcló de las capas cercanas supra o subyacentes. Los procesos de lixiviación y solubilización de sales y diversos nutrientes presentes en capas superficiales a través del uso del agua de riego o por procesos climáticas dados por la lluvia, también contribuyeron a las propiedades descritas en esta capa.

En la capa profunda tienen lugar procesos que alteran la evolución óptima del humus y propician la inmovilización del carbono, tales como la cercanía del manto freático, que promovió inundaciones permanentes en el suelo, anaerobiosis, actividad microbiana disminuída y problemas de contaminación sódico-salina. Ocasionalmente como en las

calicatas neutra y alcalina, el número de diatomeas incidió en el alto contenido de sílice; la dinámica del hierro asociada a las condiciones de inundación continua, debieron promover la presencia dominante de  $Fe^{+2}$ , poco soluble (Duchaufour, 1984).

La dinámica del humus en las calicatas esta íntimamente asociada a los movimientos laterales y verticales del agua y al drenaje de la calicata, pues generan procesos de oxigenación y actividad microbiana diferentes, así la capa superficial se vió afectada por el riego y las lluvias; en la capa blanca participó la lixiviación y, en la capa profunda, la cercanía al manto freático y la acumulación de materiales lixiviables.

Las características agrícolas, edáficas y la formación antrópica de las chinampas propician dinámicas biogeoquímicas complejas; los procesos que se desarrollan en suelos de turbas se asemejan en algunos aspectos a lo que sucede en las chinampas, pues la mineralización se dificulta; también el material orgánico puede acumularse si el aporte es continuo, en las turbas el aporte proviene de vegetación adaptada al medio y en las chinampas, por la incorporación de estiércoles, composta o lodos residuales, esto origina enriquecimiento de componentes de difícil degradación. Debido a la humificación parcial y la inmovilización de carbono, los materiales orgánicos permanecen enterrados largo tiempo por superposición de capas sucesivas, debidas en el caso de las turbas a procesos naturales y en, el de las chinampas, al manejo antrópico.

En el suelo de San Gregorio (C56) los resultados de análisis de las fracciones orgánicas separadas con bromoformo y extraídas con reactivos alcalinos, según lo señalado por Merlet (1971) (Tabla No.5), mostraron que el porcentaje de carbono en forma de AF y humina heredada ( $H_3$ ) considerados materiales jóvenes siempre permanecieron en valores más altos en la capa blanca que en muestras superficiales y profundas, mientras que la suma

de los porcentajes de carbono de las fracciones evolucionadas ( $AH + H_1 + H_2$ ), muestran órdenes inversos expresados en la siguiente serie gradativa: capa superficial > capa profunda > capa blanca. Estos resultados hicieron evidente que la mayor estabilidad del humus corresponde a las capas superficial y profunda, mientras que la capa blanca es menos estable.

Si se toman en cuenta las características analíticas del fraccionamiento del humus y se utilizan los índices para suelos forestales, el tipo de humus de las diferentes capas se clasifica como *mull*, coincidiendo con lo publicado por García et al., (1994), sin embargo las características edáficas basadas en su origen antrópico así como el hidromorfismo, modifican estos criterios, por lo cual sería más conveniente clasificarlo como *anmoor*, es difícil ubicarlos en un tipo específico, ya que no son 100% clasificables por sus características particulares.

En las capas analizadas de la calicata, la suma de las fracciones jóvenes ( $AF$  y  $H_3$ ), presentan siempre valores menores que las fracciones húmicas evolucionadas (Tabla No.5).

El índice  $AF/AH$  fue mayor de 1 en capas superficiales y blancas, mientras que en las profundas fue menor de 1 (Tabla No.5).

La escasa proporción de humina heredada sugiere que los procesos de humificación se han desarrollado principalmente por vía indirecta, por neoformación biofísicoquímica a partir de precursores solubles que desemboca en la formación de humus con predominio de los compuestos húmicos extraíbles en reactivos alcalinos ( $AH$  y  $AF$ ), sobre las fracciones insolubles, huminas de insolubilización, a excepción de lo que ocurre en la capa superficial.

Los porcentajes de carbono de cada una de las fracciones orgánicas separadas, indicadas en la Tabla No. 5, corresponden el primero al porcentaje de carbono respecto al

peso del suelo, el segundo (2) al porcentaje de carbono respecto al carbono total del suelo y el tercero (3) al porcentaje de carbono respecto al carbono de la fracción humificada.

En la capa superficial los resultados de carbono mostraron un predominio en orden decreciente del carbono correspondiente a la humina H<sub>2</sub>, AF y AH; los menores porcentajes se encontraron en forma de las huminas H<sub>1</sub> y H<sub>3</sub>. En la capa blanca se encuentran porcentajes de carbono prácticamente idénticos en las fracciones de AF, AH y H<sub>2</sub>, mientras que las huminas H<sub>3</sub> y H<sub>1</sub>, se presentaron en menor proporción. Las capas profundas mostraron que el carbono en forma de AH y AF predominaba sobre el de las huminas de insolubilización y heredada. Ello implicó que la complejidad del humus en capas superficiales se asocia a las huminas H<sub>2</sub> y a los AH, mientras que en la capa profunda se relaciona principalmente con los AH; la capa blanca, a su vez mostró, mayor homogeneidad en su composición orgánica por su equilibrio en el contenido de carbono asociado a las diferentes fracciones.

Los porcentajes de carbono en forma de MOL, mostraron los valores más altos en la capa profunda, intermedios en la capa blanca y los más bajos en la capa superficial.

El contenido de carbono correspondiente a la materia orgánica humificada (MOH) fue elevado con respecto al encontrado en la fracción de MOL.

En las chinampas las características de las fracciones orgánicas, son afectadas por el carácter alóctono de la mayor parte del material de las diferentes capas y por el carácter policíclico y antrópico de su formación. Existiendo variabilidad por la diferente naturaleza de las formas de materia orgánica (lirio, estiércol, lodo, etc.).

Tabla No. 5. Fraccionamiento de la materia orgánica de las muestras del suelo de San Gregorio Atlapulco.

Muestra.	Prof.	%C	%N	C/N	%C MOL	%C MOH		H <sub>3</sub>	AF	AF+ AH	AH	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	AF/AH	H <sub>3</sub> +AF	AH+H <sub>1</sub> +H <sub>2</sub>	
C56	10-20	8.66	0.84	8.66	0.14	7.16	1	0.16	1.65	2.98	1.33	0.9	3.10	1.24			
					1.62	82.67	2	2.07	19.05	41.61	15.36	10.39	35.79				
								3	2.51	23.04		18.57	12.57	43.30		25.55	74.44
C56	140-142	5.48	0.49	11.18	0.21	1.82	1	0.20	0.56	1.11	0.55	0.01	0.50	1.02			
					3.83	33.21	2	3.65	10.22	20.25	10.03	0.18	9.12				
								3	10.99	30.37		30.22	0.55	27.47		41.76	58.24
C56	190-200	31.07	2.15	14.45	0.51	28.19	1	0.35	9.38	23.68	14.30	0.90	3.26	0.66			
					1.64	90.73	2	1.12	30.19	76.21	46.02	2.89	10.49				
								3	3.97	33.27		50.72	3.19	11.56		37.24	65.47

1.= % de Carbono con respecto al peso 2.= Carbono orgánico respecto al carbono total

3.= Carbono orgánico respecto al carbono de la fracción humificada

MOL = Materia orgánica libre MOH = Materia orgánica humificada H<sub>3</sub> = Humina heredada

H<sub>1</sub> = Humina de insolubilización extraíble H<sub>2</sub> = Humina de insolubilización no extraíble

AF= Acidos fúlvicos AH= Acidos húmicos

### **7.2.2.2. Caracterización de ácidos húmicos por electroforesis.**

Las soluciones alcalinas de los ácidos húmicos son de carácter aniónico, lo que permite el fraccionamiento en función de su movilidad iónica, durante la electroforesis, si se desplazan sobre medios adecuados como el papel filtro que se hace conductor cuando se impregna en soluciones salinas (tetraborato sódico) y se aplican potenciales eléctricos.

El fraccionamiento electroforético de los AH presenta por lo general tres fracciones, la inmóvil o poco móvil, constituida por compuestos con mayor grado de polimerización y altos contenidos de minerales silicatados con numerosas cargas positivas, la fracción intermedia y la móvil donde predominan sustancias de carácter más polar debido a sus mayores cargas eléctricas y proporciones de grupos funcionales. La relación dada entre los constituyentes de las fracciones inmóvil y móvil (I/M) se considera como parámetro indicador del grado de polimerización, los compuestos metálicos (Cu, Fe y Al) asociados al material húmico, pueden permanecer en la fracción inmóvil o en la móvil dependiendo de su carga, si es negativa como sucede en la formación de algunos quelatos se aprecia mayor movilidad (Kononova, 1982; Almendros, 1980).

Los electroforegramas de los AH del suelo de San Gregorio mostraron que la complejidad estructural y/o el predominio de cargas positivas es mayor en las capas superficial y profunda con respecto a la capa blanca, pues el área de la fracción móvil es mayor en esta capa blanca ( Gráfica No. 2.).

El porcentaje de área de la fracción de movilidad intermedia (Gráfica No. 2) de la capa superficial es mayor que en las capas blanca y profunda, lo que denotó una mayor



**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Suelo de San Gregorio Atlapulco

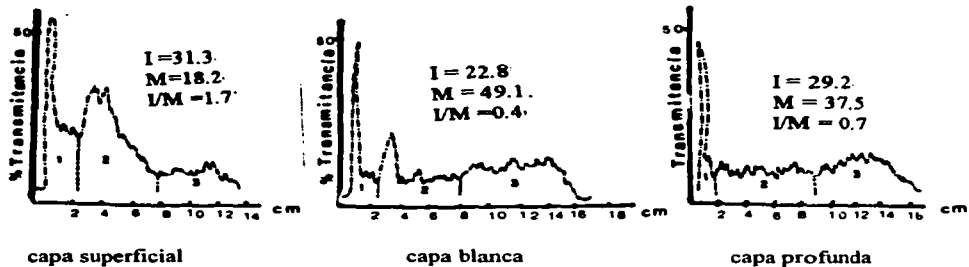
polaridad en la carga y abundancia de grupos funcionales de los AH de capas superficiales y se asocia a la menor acidez de la capa arable (Tabla No.1), que impidió la alteración de estas moléculas.

El porcentaje de área de la fracción móvil fue mayor en la capa blanca, porcentaje cercano al encontrado en la capa profunda y contrastante con el de la capa superficial, lo que implica que los AH de las capas blancas fueron menos polimerizados que los de las capas superficiales (Gráfica No. 2).

En la capa superficial los valores  $I/M$  son más altos (Gráfica No. 2), lo que corroboró alta polimerización de los AH de la superficie de esta calicata, pues la estructura química y la carga eléctrica de estas moléculas promueve poca movilidad, mientras que en las capas profunda y blanca esta relación  $I/M$  disminuye, lo que implica polimerizaciones menores.

La complejidad en la estructura química de los AH de las capas superficial y profunda basada en los datos de electroforesis y los espectros de IR (Gráficas No.2 y No.3) se atribuyó también a la resistencia conferida por la mayor concentración y, por tanto, asociación de los iones metálicos con el material orgánico (Tabla No. 4).

Gráfica No. 2. Curvas densitométricas correspondientes a los electroforegramas de los ácidos húmicos extraídos de las capas analizadas del suelo de San Gregorio Atlapulco.



### 7.2.2.3. Espectroscopía infrarroja de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral.

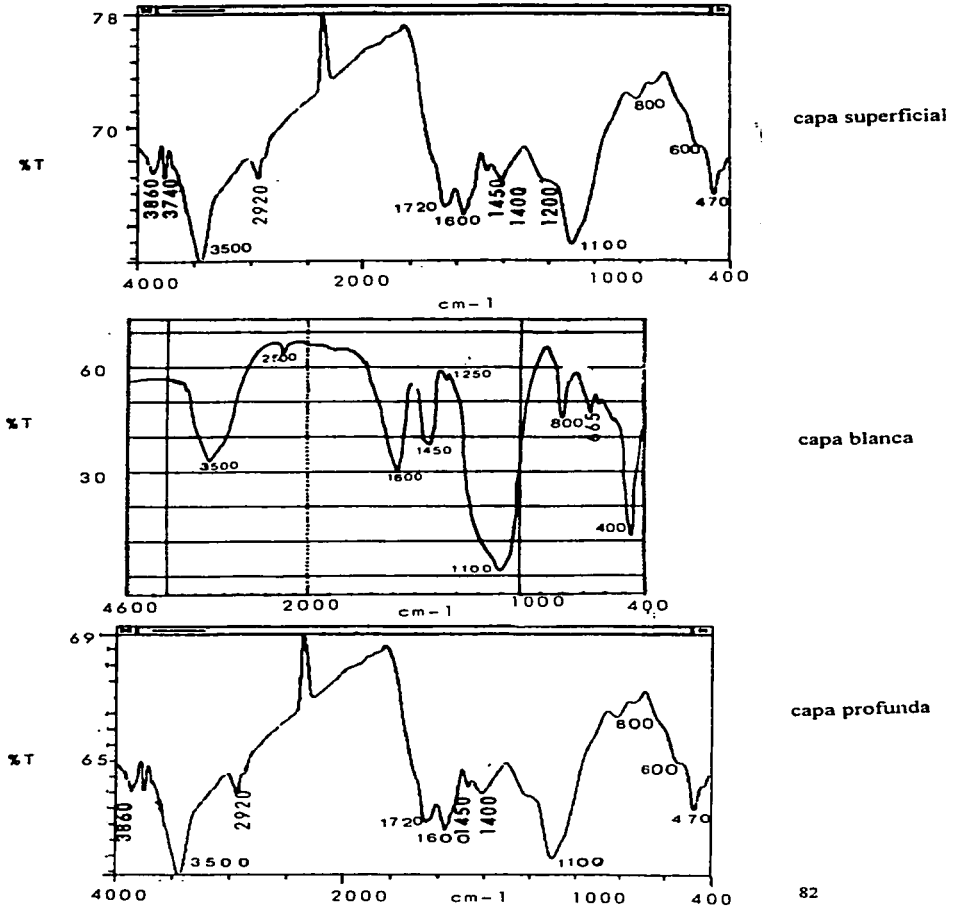
De acuerdo con el análisis de espectroscopía de IR de los AH asociados a la fracción mineral (Gráfica No.3), se observó que los de capas superficial y profunda presentaron bandas características a los  $3860\text{ cm}^{-1}$  y  $3740\text{ cm}^{-1}$ , que definieron presencia de grupos OH asociados a puentes hidrógeno, así como a  $2880\text{ cm}^{-1}$ , característica de grupos Me-OH-O y  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  y CH alifáticos indicativos de proteínas; se encontró la señal de  $3500\text{ cm}^{-1}$  que definió grupos OH disociados, en AH de la capa blanca fue evidente la banda de  $2500\text{ cm}^{-1}$  que estableció presencia de aminas primarias, secundarias y terciarias; así como grupos OH de COOH.

La banda a  $1720\text{ cm}^{-1}$  presente en AH de capas superficial y profunda es importante porque indica grupos carboxilatos  $\text{COO}^-$ . La señal a los  $1600\text{ cm}^{-1}$  encontrada en todos los espectros (Gráficas No.3) confirmó la aromaticidad de las sustancias húmicas, pues comprobó la presencia de dobles enlaces  $\text{C}=\text{C}$  en anillos aromáticos, si bien esta señal es poco diagnóstica y se encuentra afectada por grupos  $\text{C}=\text{O}$  conjugados y quinonas, por ello estas bandas fueron muy definidas y pronunciadas.

La señal  $1450\text{ cm}^{-1}$  denota la presencia de grupos metilo. En todos los espectros de IR fue muy definida la banda de  $1100\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$  la cual generalmente es asignada a grupos  $\text{C-O}$  unidos a polisacáridos o sustancias semejantes, los silicatos pueden inferir sustancialmente en la intensidad en esta región espectral. La señal de  $800\text{ cm}^{-1}$  se asoció a enlaces  $\text{C-H}$  aromáticos dentro de diversos anillos, así como moléculas  $\text{Al}_2\text{OH}$  y sílice. La débil banda  $750\text{ cm}^{-1}$  de AH de capas superficial y profunda se asigna a enlaces  $\text{C-C}$ ,  $\text{C-N}$ ,  $\text{C-O}$ , la  $500$  y  $665\text{ cm}^{-1}$  determinó presencia de  $\text{Fe}^{\text{IV}}\text{OH}$  y  $\text{Si-O-Me}$  (Al, Fe, Mg), finalmente la señal muy pronunciada a los  $400\text{-}470\text{ cm}^{-1}$ , delimitó la existencia de largas cadenas  $(\text{CH}_2)_n$  que corresponde a sustancias húmicas de carácter fuertemente alifático pero también a la presencia de  $\text{Si-O-Al}$ .

Al comparar formas y tamaños de las bandas definidas en los espectros de IR de AH de las diferentes capas analizadas, estas fueron muy parecidas, lo que implicó que el tipo de humus se diferenció en mayor medida por las proporciones relativas de las diferentes fracciones húmicas (Tabla No.5).

Gráfica No. 3. Espectros de infrarrojo de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral en el suelo de San Gregorio Atlapulco.



#### **7.2.2.4. Concentración en carbono de ácidos fúlvicos (aromáticos y alifáticos)**

En todas las capas analizadas los porcentajes de carbono asociados a los AF aromáticos fueron menores que los encontrados en AF alifáticos (Tabla No.6), siendo más notorio en las capas profundas, pues fue 10 veces más alto el valor de los alifáticos sobre los aromáticos. Los contenidos de carbono en las dos fracciones de AF coinciden con lo publicado para suelos chinamperos ( Mercado, 1993; García et al., 1994).

Los contenido de AF aromáticos y alifáticos son más elevados en la capa profunda de valores intermedios en la muestra superficial y menores en las capas blancas, lo cual se asoció al contenido en materia orgánica, al carbono total del suelo y al carbono de la fracción fúlvica.

Las relaciones AF totales/AF aromáticos ( $AF_t/AF_a$ ) indican que en la capa superficial y blanca los AF aromáticos contribuyen con una tercera parte del carbono asociado a los AF, mientras que en la capa profunda su participación es menor, en relación con la dinámica bioquímica influida por la cercanía del manto freático, que promueve la formación de estructuras menos polimerizadas.

**Tabla No. 6. Porcentajes de carbono en forma de ácidos fúlvicos aromáticos y alifáticos en el San Gregorio Atlapulco.**

Muestra	AF aromáticos	AF alifáticos	AF totales	AF totales/AF aromáticos
C56 10-20 Capa superficial	0.55	1.10	1.65	3.00
C56 140-142 Capa blanca	0.18	0.38	0.56	3.11
C56 190-200 Capa profunda	0.80	8.63	9.38	11.72

#### **7.2.2.5. Concentración de metales asociada a las fracciones de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos.**

La fracción orgánica retuvo altas concentraciones de metales; se encontró que la capa mineral de los AH fueron mayores que las de AF, las más abundantes en ambos fueron la de aluminio y fierro, de rangos intermedios el zinc, cobre y níquel y las menores el cadmio, cromo y cobalto (Tabla No. 7).

La mayoría de las diferencias en el contenido total de metales cuantificados se relacionaron con la profundidad en la calicata, la concentración más alta se presentó en la parte superficial y la menor en profundidad (capa blanca y capa profunda), a excepción de lo que ocurrió con el aluminio, cobre y zinc, cuya mayor concentración en la capa profunda, se atribuyó al elevado porcentaje de materia orgánica que, conforme a Martín y Haider (1986), Cheng y Stevenson (1986) es responsable de una alta retención por su capacidad para formar complejos metal-orgánicos. La capa blanca presentó concentraciones menores

que las capas superiores e inferiores, debido al menor porcentaje de arcilla y materia orgánica (Tabla No.1, Gráfica No.1).

Las concentraciones de metales encontradas en todas las muestras de AH y AF en su mayoría se ubicaron dentro de valores no tóxicos, puesto que el cobalto se mantuvo por debajo de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$ , el cromo no rebasó las  $15 \text{ mg kg}^{-1}$ , el plomo que se apreció en proporciones traza, el níquel estuvo por debajo de  $50 \text{ mg kg}^{-1}$ , el zinc nunca rebasó el valor de las  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  y el cobre las  $250 \text{ mg kg}^{-1}$ . El único que se encontró en rangos tóxicos fue el cadmio ( $> 1 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (Tabla No. 7) (Alloway, 1990).

La toxicidad producida por iones metálicos se modifica por diversas condiciones edáficas, como acidez, saturación de bases, cantidades y características de la materia orgánica, tipo de minerales arcillosos, así como interacciones con diversos constituyentes inorgánicos; algunas se explican por la competencia entre iones, micronutrientes esenciales y metales contaminantes. Los niveles de metales pesados que definen un daño fitotóxico son: cadmio  $5 \text{ mg kg}^{-1}$ , cobalto  $50 \text{ mg kg}^{-1}$ , cromo, cobre y níquel  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  y zinc  $300 \text{ mg kg}^{-1}$  (Kabata y Pendias, 1992; Bailey y White, 1970; Halliwell y Gutteridge, 1986).

En la calicata analizada los problemas de toxicidad se asociarían con su pH ácido, en el que se solubilizan la mayoría de los metales; sin embargo, como se ha mencionado los valores son considerados como normales dentro de suelos agrícolas. Por otro lado, existe un alto contenido de materia orgánica que actúa como amortiguador; pues se promueve la formación de complejos organominerales y organometales dependiente también del porcentaje de arcilla que fue una fracción importante (alrededor de 30% durante el fraccionamiento granulométrico) (Tabla No. 1, Gráfica No.1). La mayor interacción que pudo darse entre los metales debió estar asociada con el alto contenido de fósforo, lo que

promovió la formación de diferentes precipitados que impidieron la solubilidad (Tisdale, 1987).

La presencia de metales en la calicata debió afectar la descomposición de la materia orgánica, puesto que alteran la mineralización de nitrógeno, fósforo, degradación de celulosa, presencia de enzimas del suelo, fijación de nitrógeno, índices de respiración y población de diversos microorganismos que habitan el suelo; Babich y Stotzky, (1977), encontraron que el número total de bacterias, actinomicetos y hongos disminuyó en suelos con  $7500 \text{ mg kg}^{-1}$  de cadmio, cobre o de zinc.

El contenido de metales modifica la dinámica metabólica por su intervención en la funcionalidad de enzimas, lo que se debe a la inhibición o alteración de la actividad por su efecto en grupos activos y en la desnaturalización proteica. Así, por ejemplo, las fosfatasas son inhibidas por cadmio a concentraciones de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$ , la nitrificación disminuye con  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  de zinc en suelos con pH de 7 a 7.7, la fijación de  $\text{N}_2$  en *Azotobacter* se altera a concentraciones mayores de  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  de cobalto, cobre, níquel, zinc o fierro. (Tyler, 1981; Boyd y Mortland, 1985).

Mordvedt (1983) encontró 4 tipos de quelatos formados entre AH y AF con cobre, cobalto y cromo. La capacidad de formación de quelatos entre AH y metales, principalmente a fierro es alta por su gran número de grupos funcionales asociados a su mayor complejidad en la molécula a base de anillos fenólicos o quinónicos (Cheshire et al., 1979).

Stevenson (1994) concluye que los complejos metálicos de AH son solubles cuando su relación con los iones metálicos es baja, es decir cuando se dan pocas combinaciones de la estructura carbonada de los AH, pero la precipitación ocurre cuando las combinaciones



se incrementan, neutralizando los grupos COOH. La mayor parte de la retención de metales se asocia a los grupos funcionales, en AH el valor de concentración de COOH es variable, la cantidad promedio es de 1.5 a 5 meq g<sup>-1</sup> lo que absorbe de 48 a 160 mg g<sup>-1</sup> Cu.

Los metales forman complejos estables con una amplia variedad de ligandos, su estabilidad incrementa conforme aumenta la electronegatividad del metal. En complejos formados con un ligando en series de metales divalentes, disminuye en el orden siguiente: Pb>Cu>Ni>Co>Zn>Cd>Fe>Mn>Mg, ésta serie varía en relación con la naturaleza del ligando, interacciones con otros iones y pH. Las constantes de estabilidad de complejos formados entre varios metales y AF, son mucho más elevadas a pH de 5 que a 3.5. La estabilidad de los complejos organominerales en las distintas capas de la calicata pudo diferenciarse por los valores de pH (Tabla No. 1) y por la concentración de metales.

La presencia de algunos ácidos orgánicos presentes en el suelo pueden disminuir parcialmente la toxicidad de metales y aunque estos últimos son más abundantes bajo condiciones ácidas como se aprecia en el Tabla No.7, se puede deducir que la presencia de ácidos favoreció la formación de quelatos.

El cobre fue uno de los iones que se retuvieron en mayores porcentajes en la fracción de AF, puesto que han descrito formaciones de complejos más estables que con otros iones (Mordvedt et al., 1983).

Las concentraciones de metales en estos suelos se explica por la presencia de diversos materiales minerales y orgánicos existentes, entre los primeros podemos señalar esmectitas, haloisita, moscovita, biotita, feldespatos, piroxenos (augitas) y olivino, así como anfíboles tipo hornblendas pardas basálticas verdes (Aguilera et al., 1987-1994).

Tabla No. 7. Concentración de metales de las fracciones orgánicas en el suelo de San Gregorio Atlapulco.

Muestra	Fracción	mg kg <sup>-1</sup>							
		Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
capa superficial	AH	2115	4	2659	3	5	18	21	12
	AF	1208	1	706	1	1	5	12	8
C56 140-142 capa blanca	AH	729	2	800	2	2	10	12	8
	AF	191	0	295	1	0	1	6	5
C56 190-200 capa profunda	AH	6445	2	1212	2	3	10	79	20
	AF	2150	1	469	1	1	2	70	10

### 7.2.3. Polisacáridos totales.

La presencia de diatomeas pudo influir en la concentración de polisacáridos encontrados en la capa blanca, pues en ellas existen elevados contenidos de polisacáridos en su estructura los cuales varían de 6 a 50%, del total el 53% corresponde a la glucosa, el 12% a galactosa, el 10% a manosa, el 2% a xilosa, el 4% a ribosa al igual que para fucosa y el 14% a ramnosa (Werner, 1977).

En la Tabla No.8 se observa que los polisacáridos lábiles dominaron en todas las capas de la calicata, pues participaron con porcentajes de 55 a 86.% con respecto a los totales y en las relaciones totales/lábiles, donde todos los valores fueron mayores de 1; el más alto se encontró en la capa superficial, el intermedio en la capa profunda y el menor en la capa blanca, lo que implica que ésta última tiene mayor porcentaje de polisacáridos lábiles.

La degradación de polisacáridos en el suelo se modifica, debido a que pueden asociarse con iones fierro y aluminio de estructuras cristalinas arcillosas que originan resistencia e impiden su ruptura (Chenu et al., 1994).

Por tanto bajo condiciones de campo en esta chinampa, debió producirse mayor protección de polisacáridos en la capa superficial y profunda del suelo, debido a que la concentración de metales en la fracción de arcilla y en el suelo fue más alta (Tabla No.1 y No. 4, Gráfica No.1).

En el extracto del liofilizado de polisacáridos de este suelo ácido, el análisis de microsonda sólo detectó presencia de fierro, magnesio y calcio (Tabla No. 9). La capa superficial mostró los mayores porcentajes relativos de calcio y fierro, mientras que la blanca presenta máximos porcentajes de magnesio y menores tanto en calcio como en fierro, finalmente la capa profunda conservó valores intermedios en los tres.

Este análisis refleja que los polisacáridos están asociados a diversos metales, en este caso particular se refieren únicamente a fierro, magnesio y calcio, sin embargo existen numerosos estudios que describen que además de los elementos señalados se relacionan ampliamente con aluminio y zinc.

**Tabla No.8..Concentración de polisacáridos totales y lábiles en el suelo de San Gregorio Atlapulco.**

Muestra	Tipo de polisacárido	Concentración de polisacáridos g 100 g <sup>-1</sup>	Relación polisacáridos totales/ polisacáridos lábiles
C56 10-20 capa superficial	Totales	0.79	1.8
	Lábiles	0.44	
C56 140.-142 capa blanca	Totales	0.63	1.2
	Lábiles	0.54	
C56 190-200 capa profunda	Totales	1.20	1.3
	Lábiles	0.95	

**Tabla No. 9. Análisis de microsonda de los polisacáridos totales en el suelo de San Gregorio Atlapulco.**

Muestra	Porcentajes		
	Mg	Ca	Fe
C56 10-20 capa superficial	66.4	31.9	1.7
C56 140.-142 capa blanca	85.2	14.8	0.05
C56 190-200 capa profunda	74.1	25.2	0.7

#### **7.2.4. Número de diatomeas en el suelo.**

El número de diatomeas es mayor en la capa blanca y menor en la superficie y profundidad de la calicata, lo que se asocia con el diferente origen de las capas (Tabla No.10), pues la presencia de diatomeas en la capa superficial se debe a su distribución dentro del agua que se utiliza para el riego y se extrae del lago, en la capa blanca los

períodos de sequía promovieron que el agua del lago se evaporara y se concentrara un gran número y en la capa profunda se debió a la cercanía del manto freático así como a la iluviación del agua de riego.

Se identificaron diatomeas de los géneros *Cymbella sp.*, *Navicula sp.*, *Alloucoseira sp.*, *Fragilaria sp.*, *Denticula sp.*, *Epithemia sp.*, *Gomphonema sp.* y *Achnanthes sp.* y de la especie *Cocconeis placentula* (Werner, 1977) (Figuras No. 21-25).

**Tabla No. 10 Número de diatomeas en el suelo de San Gregorio Atlapulco**

Muestra	Número de diatomeas por gramo de suelo
C56 10-20 capa superficial	116,418
C56 140-142 capa blanca	1,480,895
C56 190-200 capa profunda	436,716

**7.2.5. Patrones de distribución del carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas del suelo de San Gregorio Atlapulco.**

Los valores de carbono y nitrógeno del suelo calculados en relación con la suma de sus contenidos en cada fracción ligada al suelo y su granulometría, siempre fueron menores que los cuantificados en la muestra de suelo (Tabla No.12), por lo que se estimó que el

material restante fue MOL ubicándose altos porcentajes de carbono y de nitrógeno en esta fracción (Gráfica No.4).

La fracción de MOL es material orgánico más recientemente depositado, poco evolucionado, que se encuentra constituido por partículas macroscópicas que incluyen en su composición macromoléculas vegetales como las ligninas, celulosas y hemicelulosas, así como compuestos de nitrógeno y fósforo, por lo general en formas no asimilables por la vegetación.

Teniendo en cuenta los resultados de cada fracción como el cálculo basado en 100 g de muestra así como al relacionar los datos con la distribución granulométrica, casi todas las fracciones en la capa profunda conservaron contenidos de carbono y nitrógeno mayores que la superficial, que presentó valores intermedios y la blanca menores valores (Tablas No. 11 y No.12). Esto concuerda con los resultados obtenidos en porcentajes de carbono y nitrógeno del suelo (Tablas No.2).

Es importante señalar que gran parte del carbono y nitrógeno del suelo de esta chinampa se encuentra formando un complejo con la fracción arcillosa y aunque existan grandes cantidades de materia orgánica, disminuye su disponibilidad por parte de microorganismos así como la liberación de nutrientes para la vegetación, debido a que las estructuras formadas tienen numerosos enlaces físicos, electrostáticos y de coordinación que las hacen resistentes y dificultan su degradación.

A su vez, también la fracción arcillosa mostró los más altos contenidos de carbono y nitrógeno, disminuyendo conforme aumentó el tamaño de partícula de las fracciones. Mientras que al asociar la granulometría del suelo, el limo fino y grueso variaron esta regla

debido a su baja proporción, sin embargo la arena siempre conservó las menores retenciones de estos elementos (Tabla No.11 y 12, Gráfica No.4).

Respecto a los enlaces y estabilidad química existente entre el material orgánico y mineral, las arcillas retienen más cationes orgánicos debido a la complejidad de su estructura, lo que origina mayor superficie de reacción, que dificulta la degradación de las moléculas, aún con la presencia de intensa actividad microbiana, por lo que se mantiene la unión organomineral estable. Esta situación contrasta con la de fracciones más gruesas como la arena donde predominan minerales primarios de estructura más simple, que promueven pocas asociaciones con moléculas orgánicas.

Los valores de las relaciones C/N de todas las fracciones (Tablas No. 11 y 12) aumentaron con la profundidad del suelo, la capa más cercana al manto freático tuvo los valores más altos, debido a la acumulación de enormes cantidades de estiércol que incrementaron la concentración de materia orgánica que no llegó a mineralizarse por la abundancia y complejidad del material o por las condiciones físicas, medioambientales y microbiológicas desfavorables que indujeron a la inmovilización de carbono. Así pues se puede señalar que en esta capa profunda el exceso de humedad promovió la anacrobiosis, disminuyendo la actividad y diversidad microbiana con respecto a las capas superficiales, lo que contribuyó a la acumulación de material orgánico y al aumento de las relaciones C/N.

Generalmente las formaciones orgánicas potentes y poco activas como las turbas, suelen ser más ricas en nutrientes en la superficie que en profundidad. Que aunque no se sabe exactamente a que se debe puede ser atribuido a varias causas entre las que se pueden citar la mineralización en superficie que acumula bases y nitrógeno estable, la lixiviación

horizontal que empobrece las capas profundas o los aportes externos superficiales (abonos o aporte eólico) y movimientos capilares ascendentes de la solución del suelo.

En la capa profunda la inmovilización se comprueba por los valores de nitrógeno altos asociados a la arcilla y al limo fino (Tabla No. 11) o al limo medio, cuando se basaron los datos en la distribución granulométrica (Tabla No.12), los índices C/N encontrados en estas fracciones de valores superiores a 15 se consideran propios de degradaciones lentas del material orgánico, por lo tanto pobre disponibilidad de nutrientes (Tablas No. 11 y 12, Gráfica No.4).

Las capa superficial en la mayoría de sus fracciones conservaron relaciones C/N menores a 15 (Tablas No. 11 y 12), por lo que podría pensarse que definieron condiciones agrícolas óptimas para el buen desarrollo de cultivos, debido al fácil acceso o absorción de los nutrientes, sin embargo las condiciones alóctonas de la materia orgánica en las chinampas, impiden que la relación C/N pueda considerarse indicativa de la disponibilidad de nitrógeno como en los suelos naturales (agrícolas o forestales).

En general, en todas las capas (superficial, blanca y profunda) se encontraron mayores relaciones C/N en fracciones de limo medio y grueso (Tabla No. 11) o limo total y arcilla (Tabla No. 12), mientras que la arena conservó los menores valores (Tablas No. 11 y 12). Esto implica poca disponibilidad del nitrógeno en la chinampa, pues si se observa la Tabla No. 1 o la Gráfica No. 1 de distribución granulométrica la fracción dominante corresponde al limo medio o arcilla en la mayoría de las capas analizadas de esta calicata, esto se hizo más evidente en las capas superficial y profunda, y además en esta última se obtuvo que aunque existan bajas relaciones C/N en el suelo total, las fracciones de arcilla, limo medio o limo total retuvieron los mayores contenidos de carbono y nitrógeno, lo que



indica que la permanencia de carbono y nitrógeno se asocia a la retención de estos elementos en fracciones finas que promueven probablemente una resistencia a la degradación.

En conclusión, este suelo conserva altos porcentajes de materiales orgánicos asociados a fracciones finas, que por sus fuertes enlaces promueven resistencia a la degradación, lo que hace poco accesibles los nutrientes a los cultivos, a esto también se asocia la existencia de material poco fragmentado que origina lenta disponibilidad mineral a la flora y fauna de la chinampa.

Cuando se realizó el tratamiento del complejo arcilla humus (CAH) con  $H_2O_2$ , se observó que los contenidos de carbono y nitrógeno disminuyeron notablemente quedando solamente la fracción mineral de arcilla (Tabla No. 11), que mostró en la capa profunda el mayor porcentaje de carbono que las capas superficial y blanca; mientras que el contenido de nitrógeno recalcitrante se conservó en mayor proporción en la arcilla extraída de la parte superficial del suelo. Las relaciones C/N entonces fueron muy bajas (Tabla No. 11), lo que implica rápida disponibilidad de nitrógeno .

El contenido de fósforo asimilable en las fracciones arcilla y CAH (Gráfica No.5), se encontró en mayor proporción en las primeras, lo que se explica porque el porcentaje de materia orgánica existente en CAH, disminuye la relación de arcilla, siendo menor el contenido del fósforo que pudiera retener.

En las fracciones arcillosas y de CAH se encontraron relaciones directamente proporcionales entre el contenido de fósforo y el porcentaje de arcilla en el suelo (Tabla No. 2, Gráfica No. 5), por tanto estas fracciones tienen mayor porcentaje de fósforo en las capas

superficiales y menores en la capa blanca, mientras que la capa profunda presentó valores intermedios (Gráfica No. 5).

Gráfica No. 5. Porcentajes de fósforo asimilable en complejos arcilla humus y arcillas del suelo de San Gregorio Atlapulco.

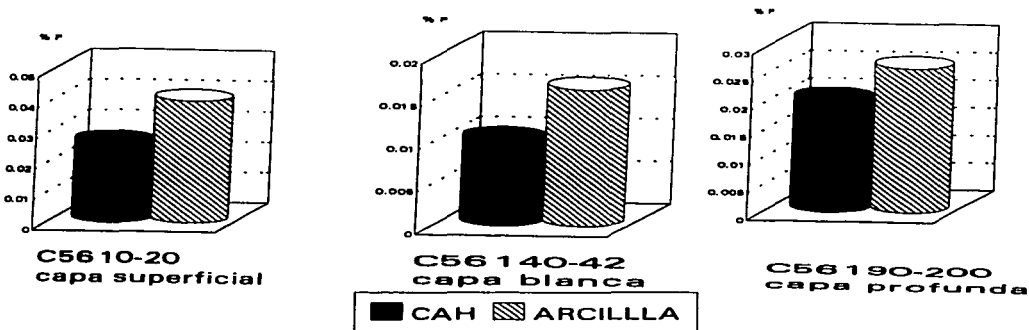


Tabla No.11. Contenidos de carbono y nitrógeno en g 100 g<sup>-1</sup> de las fracciones granulométricas, en el suelo de San Gregorio Atlapulco.

Muestra		Arcilla	CAH	CLF-H	CLM-H	CLG-H	CAr-H
C56 10-20 capa superficial	% C	0.01	9.47	6.16	4.12	3.77	1.75
	% N	0.04	0.80	0.76	0.40	0.25	0.24
	C/N	0.25	11.84	8.03	10.30	15.08	7.29
C56 140-142 capa blanca	%C	0.02	5.74	4.21	3.54	2.05	1.02
	%N	0.01	0.46	0.39	0.24	0.12	0.11
	C/N	2	12.48	10.79	14.75	17.88	9.27
C56 190-200 capa profunda	%C	0.05	24.27	13.52	10.70	9.10	3.09
	%N	0.03	1.2	0.80	0.44	0.33	0.30
	C/N	1.66	20.22	16.90	24.32	27.57	10.30

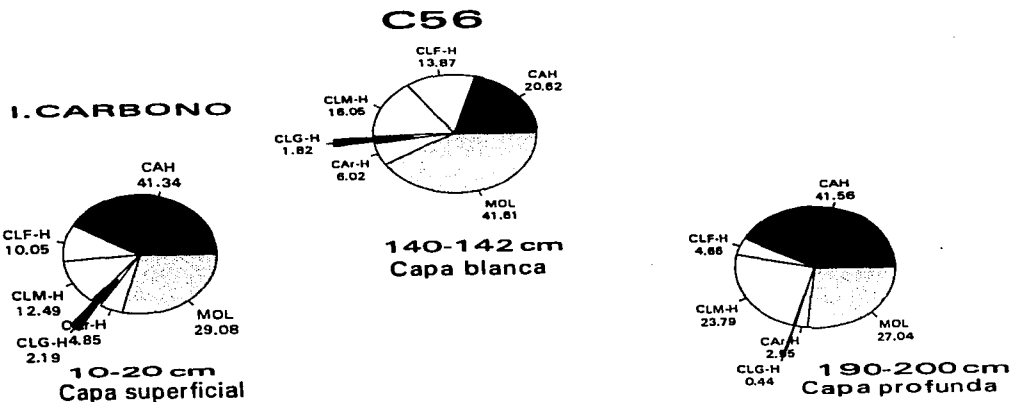
CAH= complejo arcilla humus, CLF-H= complejo limo fino humus, CIM-H= complejo limo medio humus, CLG-H= complejo limo grueso humus, CAr-H= complejo arena humus, Σ = Sumatoria

Tabla No. 12. Contenidos de carbono y nitrógeno con respecto a la distribución granulométrica en el suelo de San Gregorio Atlapulco.

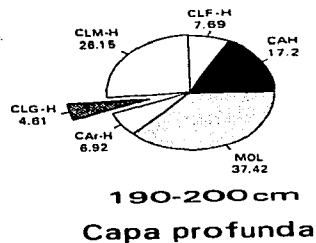
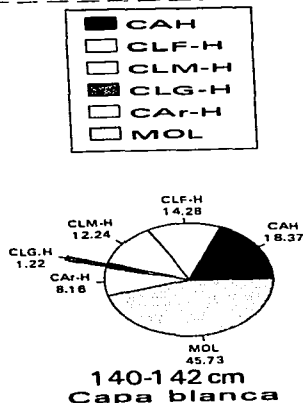
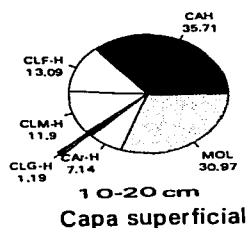
Muestra		CAH	CLF-H	CLM-H	CLG-H	CAr-H	Suelo	$\Sigma$
C56 10-20 capa superficial	% C	3.58	0.87	1.08	0.19	0.42	8.66	6.14
	% N	0.30	0.11	0.10	0.01	0.06	0.84	0.58
	C/N	11.93	7.91	10.80	19.00	7.00	10.31	10.59
C56 140-142 capa blanca	%C	1.13	0.76	0.88	0.10	0.33	5.48	3.20
	%N	0.09	0.07	0.06	0.006	0.04	0.49	0.27
	C/N	12.56	10.86	14.66 12.43 LT	16.66	8.25	11.84	12.31
C56 190-200 capa profunda	%C	7.49	0.84	4.29	0.08	0.46	18.02	13.16
	%N	0.37	0.05	0.17	0.03	0.045	2.15	0.65
	C/N	20.24	16.80	25.23 21.71 LT	2.67	10.22	8.38	20.25

LT = limo total, CAH= complejo arcilla humus, CLF-H= complejo limo fino humus, CIM-H= complejo limo medio humus, CLG-H= complejo limo grueso humus, CAr-H= complejo arena humus,  $\Sigma$  = Sumatoria

Gráfica No. 4. Porcentajes de carbono y nitrógeno de las fracciones granulométricas complejadas con material húmico en el suelo de San Gregorio Atlapulco (C56).



**II. NITROGENO**



### **7.2.6. Capacidad de intercambio catiónico total e iones intercambiables en las diferentes fracciones granulométricas.**

La fracción arcilla siempre presentó los valores más elevados de capacidad de intercambio catiónico (CICT) al compararse con los CAH (Gráficas No.6 a 8), ello se explicó por su constitución estructural compleja con numerosos sitios de intercambio. Los valores de CICT en la fracción arcillosa de las capas superficiales y profundas fueron más altos que los publicados por Tamhane y Motiramani (1986) para suelos de textura arcillo arenosa y limo arenosa con arcilla montmorillonítica, asimismo se enmarcan dentro de valores típicos de las montmorillonitas 80 a 120  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$ . La capa blanca mostró valores menores (Gráfica No.7), que fueron muy superiores a los reseñados para caolinitas de 1-10  $\text{cmol kg}^{-1}$  por Ortega (1981).

También se observó tendencia a disminuir la CICT conforme aumentó el tamaño de partícula de las diferentes fracciones, encontrándose los valores mayores para las fracciones inorgánicas arcilla y limo, excepto en el limo grueso, que junto con la arena mostró un comportamiento inverso, la capacidad de intercambio catiónico en estas fracciones se asoció predominantemente a la materia orgánica, lo que es lógico puesto que las fracciones gruesas (limo grueso y arena) tienen pocos grupos reactivos con posibilidades de intercambio.

Generalmente la CICT se asocia a fracciones finas de dimensiones menores a 0.02 mm correspondientes a limos y arcillas; sin embargo, en los resultados presentados en esta investigación se encontraron CICT considerables en las fracciones gruesas (limo grueso y arena), lo cual se atribuyó, en primer lugar, a la presencia de iones solubles y también a la

fuerte asociación entre materia orgánica y fracciones inorgánicas que son difíciles de romper aunque se apliquen tratamientos como el ultrasonido o la oxidación con agua oxigenada.

Se apreció también que las concentraciones de magnesio casi siempre son mayores que las de calcio (Gráficas No.6~8), lo que se explica por el material de las formaciones geológicas circundantes a la zona chinampera, que tienen elevados contenidos de minerales ferromagnesianos, constituidos primordialmente de andesitas, basaltos, traquiandesitas, dacitas, lutitas y riolitas (Mooser, 1963), los que promovieron la formación de montmorillonita, arcilla que requiere para su formación un medio rico en magnesio (Dixon, 1989) y que se corroboró por los difractogramas de rayos X y espectros de IR (Gráficas No.9~12; Figuras No.11~14)

Asimismo, se apreciaron ordenes descendentes en la concentración de estos iones, al igual que en la CICT, al aumentar el tamaño de partícula. Cuando se comparan las fracciones inorgánicas complejadas a la fracción húmica con las fracciones inorgánicas se observa que las fracciones tienen mayores concentraciones de iones ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) en todas las muestras (Gráficas No.6~8), atribuible al aporte de estos iones por parte de la materia orgánica, así como por la neoformación, puesto que el calcio se encuentra abundantemente en células vegetales y animales. Así también el magnesio es constituyente de la molécula de clorofila (Tisdale, 1987).

La concentración de sodio mostró ordenes descendentes en relación con el aumento del tamaño de partícula, sin embargo en la mayoría de los casos la fracción de limo grueso y arena presentan ligeros incrementos variando el orden mencionado (Gráficas No.6~8).

La capa blanca mostró los menores valores de CICT y la capa profunda los mayores en el CAH (Tabla No.13), atribuible y relacionado con el contenido en materia orgánica (Tabla No.1). En la fracción arcillosa la CICT es mayor en la capa superficial, atribuible probablemente al mayor contenido de montmorillonita (Gráficas No.9-12).

Los valores de calcio de las fracciones CAH y arcilla en las capas profundas son más elevados que los de capas blancas y superficiales; mientras que el contenido de magnesio en estas mismas fracciones es mayor en la capa superficial (Gráfica No.7-9). Esto se explicó por la variabilidad en el manejo agrícola, así como por la actividad microbiológica generada por el alto porcentaje de materia orgánica.

También, los valores de magnesio fueron mayores en las fracciones de limo fino y medio en las capas profundas, mientras que el limo grueso y arena presentaron mayor concentración de magnesio en las capas superficiales (Gráficas No. 6-8). Esto es importante, puesto que cuando se observa la Tabla No.1 y la Gráfica No.1, se aprecia que en la distribución granulométrica el porcentaje de limo medio en la capa profunda del suelo ácido contribuye con altos porcentajes.

La determinación del contenido de sodio reviste un especial interés en esta calicata ácida, puesto que fue el suelo que en el momento de estudiarlo aún no presentaba problemas de sodicidad, por lo que resulta de interés el prevenir que se transforme en salino o sódico salino, a través del manejo adecuado donde se incluya, entre algunas indicaciones importantes, la disminución de altas dosis de estiércol, la aplicación de lavados al suelo, el uso de riego por aspersión, o incorporación de cultivos de halofitas que extraigan diversas sales acumuladas.

El contenido de sodio es más alto en la mayoría de las fracciones de las capas profundas (Gráfica No. 8), lo que induce a pensar que una gran cantidad de sodio fue aportado tanto por la materia orgánica en forma de basura urbana, como por el agua, puesto que esta capa tuvo un alto porcentaje de materia orgánica (Tabla No 1) y fue la más cercana al manto freático. Este ión sodio provino naturalmente del riego con aguas residuales y tratadas en las que se incorporaron diversos detergentes y desechos, de algunos abonos orgánicos principalmente estiércol, así como de fertilizantes incorporados al suelo.

Asimismo, se observó que la fracción arcillosa en todas las capas de la calicata ácida retuvo menores contenidos de sodio que las restantes fracciones (Gráficas No. 6-8). El limo grueso y arena destacaron por su mayor contenido en sodio, que originaron altos PSI a veces mayores de 15 como ocurrió en las capas blancas y profundas, si bien en la mayoría de las fracciones los PSI fueron de valores menores a 15 (Tabla No. 13).

En todas las capas analizadas (superficial, blanca y profunda), la fracción de limo fino retuvo mayores concentraciones de sodio que la arcilla encontrándose descensos progresivos hacia la fracción de limo medio y aumentos en las fracciones de limo grueso y arena (Gráficas No. 6-8) y encontrándose que los PSI asociados a cada fracción fueron mayores en limo medio, limo grueso y arena cuando estuvieron asociados al complejo húmico de la materia orgánica (Tabla, No.13).

Esto se explicó porque la fracción orgánica, por su gran número de grupos funcionales con capacidad de intercambio retuvo estos iones sodio que, aunque no fueron suficientes para caracterizar al suelo como sódico-salino mostraron cierta tendencia a la acumulación, siendo más notoria la retención en las fracciones inorgánicas más gruesas.



La presencia del ión potasio se caracterizó por ser baja en las diversas fracciones (Gráficas No. 6~8), encontrándose un mayor contenido en las fracciones arcillosa y de CAH en todas las muestras analizadas, lo que se justificó por su contenido de arcilla expandible que promovió la fijación de este ión dentro de sus celdas cristalinas.

También hubo menor concentración de potasio a medida que aumentó el diámetro de partícula (Gráficas No. 7~9), debido a que este macronutriente es fácilmente lixiviable en las fracciones arenosas. El potasio existente en la fracción mineral, proviene del material parental constituido por algunas micas, lo que se corroboró con los resultados de DRX (Gráficas No.11~12), MEB y MET (Figura No.7).

También, el potasio de esta calicata ácida (C56) se concentró en capas profundas y menos en la capa blanca, conservándose el valor intermedio en las capas superficiales (Gráficas No.6~8).

Las fracciones analizadas en la mayoría de las muestras (Tabla No.13), mostraron descenso en el PSB en función del tamaño de partícula y también se caracterizaron porque se observaron porcentajes más altos en las fracciones complejadas con materia orgánica, debido al elevado número de grupos funcionales de ésta última.

En las capas superficiales los PSB del limo medio y grueso son más altos que los de limo fino, lo que modifica la regla de menor PSB a mayor diámetro de partícula.

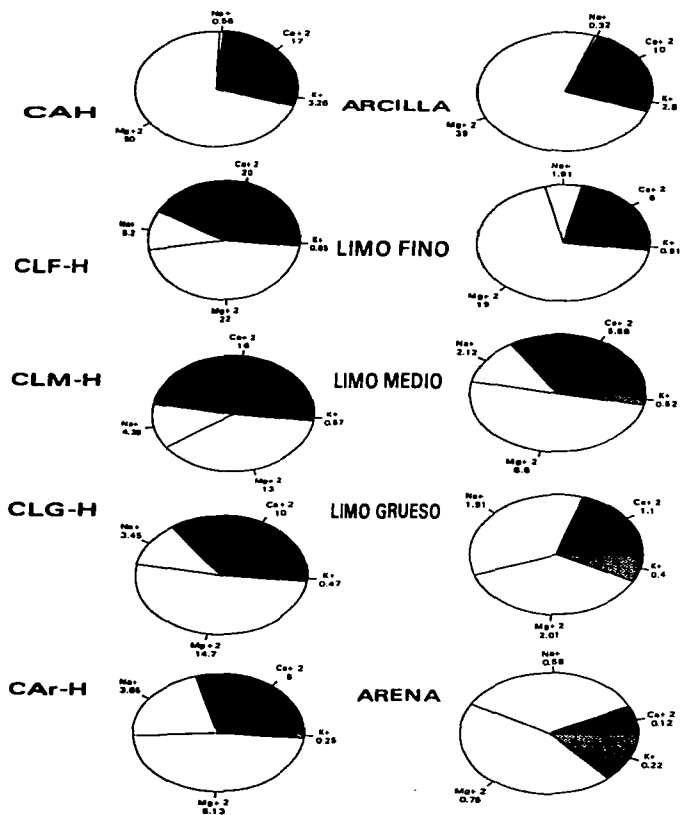
Al compararse complejos organo-miñerales y material inorgánico entre las capas superficial y profunda, se apreció que los primeros mostraron mayor PSB en las capas superficiales, mientras que las fracciones inorgánicas solas presentaron un mayor PSB en las capas profundas.

Las relaciones Ca:Mg de las diferentes fracciones muestran que el complejo limo fino humus (CLF-H) y complejo limo medio humus (CLM-H) extraídos de la capa superficial tienen casi el mismo contenido de ambos iones intercambiables, mientras que en la capa blanca el limo medio y el CLG-H presentan mayor balance. Sin embargo en todas las fracciones, tanto de la capa superficial como de la capa blanca y profunda, siempre mostraron valores Ca:Mg menores a 1, exceptuando el CLM-H de la capa superficial, lo que implica el predominio del magnesio sobre el calcio. Las fracciones más gruesas (limo grueso y arena) y las más finas (arcilla y limo fino) mostraron menores valores en sus relaciones y, puesto que la suma de ambas fracciones resultó predominante en porcentaje, aparece en el suelo total un predominio de magnesio sobre calcio (Tabla No.2; Gráficas No. 2, 6-8). Las fracciones asociadas a material húmico, si se comparan con sus homólogas muestran valores numéricos mayores que las fracciones libres de materia orgánica, lo que implica mayores contenidos de calcio (Gráficas No. 6-8). Respecto a las relaciones Ca:Mg comparando, fracciones semejantes entre capas superficial, blanca y profunda, la mayoría de las fracciones en la primera muestran valores más elevados, indicando contenidos de magnesio mayores con respecto a las restantes profundidades de la calicata (Gráficas No. 6-8).

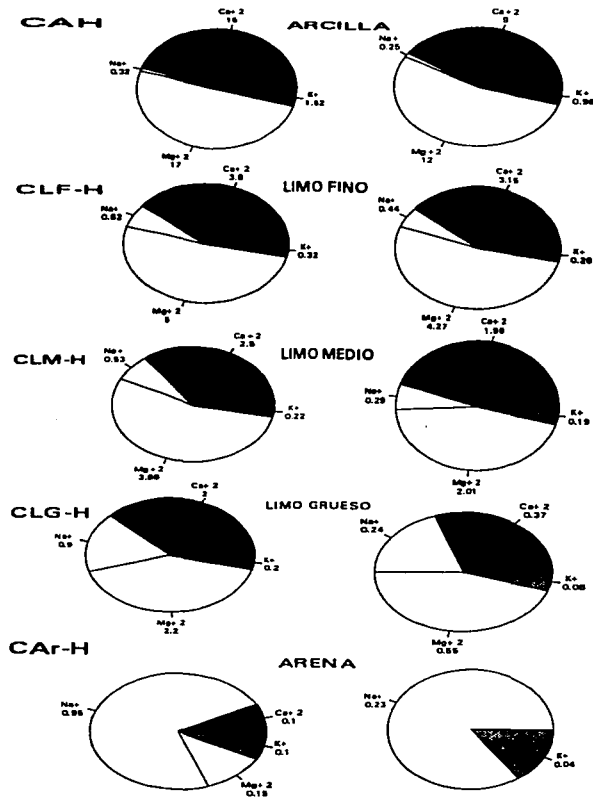
Las relaciones Ca:K en las fracciones de cada capa analizada (Tabla No. 13) mostraron el predominio de calcio sobre potasio, siendo más notoria la diferencia entre uno y otro en las fracciones limosas y menos manifiesta en las arcillas y arenas, lo cual en las primeras se explicó por su mayor contenido de potasio y en las segundas por su baja proporción de calcio.

**Las relaciones K:Na a lo largo de toda la calicata (Tabla No. 13) fueron menores a 1 en limos y arenas asociadas o no a materia orgánica, lo que indica alta concentración de sodio con respecto al sodio, mientras que en las fracciones arcillosas estos índices aumentaron de valor, lo que implicó mayores contenidos de potasio y menores de sodio (Gráficas No. 6-8), lo que definitivamente induce mejores respuestas en el bioensayo.**

Gráfica No.6. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa superficial (C56 10-20 cm) en  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$  del suelo de San Gregorio Atlapulco.



Gráfica No.7. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa blanca (C56 140-142 cm) en cmol (+) kg<sup>-1</sup> del suelo de San Gregorio Atlapulco.



Gráfica No.8. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa profunda (C56 190-200 cm) en  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$  del suelo de San Gregorio Atlapulco.

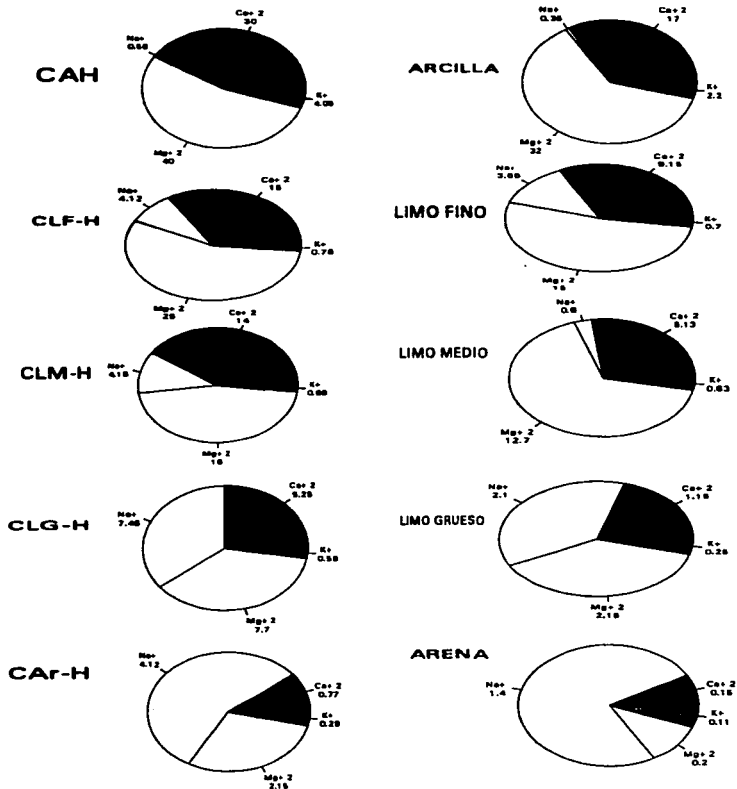


Tabla No. 13. Relaciones entre los principales iones intercambiables de las diferentes fracciones granulométricas del suelo de San Gregorio Atlapulco.

cmol (+) kg <sup>-1</sup>							
Muestra	Fracción	CICT	Ca:Mg	Ca:K	K:Na	PSB	PSI
C56 10-20 capa superficial	CAH	85.00	0.34	5.21	5.82	83.32	0.66
	Arcilla	115.80	0.26	3.57	8.75	45.00	0.28
	CLF-H	58.40	0.91	30.77	0.12	81.93	8.90
	Limo fino	74.30	0.32	11.76	0.27	17.42	2.57
	CLM-H	41.60	1.23	28.07	0.13	81.63	10.55
	Limo medio	69.85	0.68	11.31	0.24	24.51	3.03
	CLG-H	39.60	0.68	21.28	0.20	72.27	8.71
	Limo grueso	23.00	0.55	2.75	0.21	23.56	8.30
	CAR-H	25.12	0.61	20.00	0.07	67.79	14.53
	Arena	12.10	0.16	0.54	0.38	13.80	4.79
C56 140-42 capa blanca	CAH	42.00	0.88	9.87	4.75	80.57	0.76
	Arcilla	51.20	0.75	9.18	3.92	43.42	0.49
	CLF-H	22.80	0.76	11.87	0.52	42.72	2.72
	Limo fino	32.00	0.74	12.11	0.59	25.37	1.37
	CLM-H	18.15	0.65	11.36	0.41	39.17	2.92
	Limo medio	29.00	0.98	10.42	0.65	15.41	1.00
	CLG-H	15.95	0.91	10.00	0.22	33.23	5.64
	Limo grueso	8.95	0.67	6.17	0.25	13.63	2.68
	CAR-H	4.05	0.67	1.00	0.10	32.09	23.46
	Arena	2.27	nd	nd	0.17	11.89	10.13
C56 190-200 capa profunda	CAH	96.46	0.75	7.41	7.23	77.35	0.58
	Arcilla	104.00	0.53	7.73	6.11	49.57	0.34
	CLF-H	60.15	0.60	19.73	0.18	74.61	6.85
	Limo fino	75.80	0.61	13.07	0.19	37.60	4.81
	CLM-H	47.80	0.87	20.59	0.16	72.87	8.68
	Limo medio	71.12	0.41	8.19	1.05	26.84	0.84
	CLG-H	40.29	0.68	8.90	0.08	52.12	18.51
	Limo grueso	25.12	0.53	4.60	0.12	22.49	8.361
	CAR-H	28.69	0.36	2.65	0.07	25.55	14.36
	Arena	8.70	0.75	1.36	0.08	21.38	16.09

CICT= capacidad de intercambio catiónico total

PSB= porcentaje de saturación de bases

PSI = porcentaje de sodio intercambiable

CAH= complejo arcilla humus

CLF-H= complejo limo fino humus

CLM-H= complejo limo medio humus

CLG-H= complejo limo grueso humus

CAR-H = complejo arena humus

### **7.2.7. Contenido en metales totales de las fracciones granulométricas.**

Los CAH retuvieron el mayor contenido de metales totales con respecto a las arcillas (Tabla No.14), lo que se debe a los grupos que aporta la materia orgánica, que promueven la retención o formación de organominerales (Greenland y Hayes, 1978). En toda la calicata el fierro y el aluminio destacaron por sus altas concentraciones, mientras que el cobalto, cromo y cadmio se encontraron en bajas concentraciones; finalmente el níquel, zinc y cobre mostraron valores intermedios, como corresponde a la presencia de diferentes minerales piroxenos, micas, feldspatos y arcillas illita, montmorillonita, haloisita y caolinita identificadas en este suelo (Gráficas No. 11 y 12; Figuras No. 7~20) que tienen un elevado contenido de fierro y aluminio, mientras que los restantes están en menores proporciones, destacando el zinc y cobre por su afinidad con la materia orgánica, de ahí que se encontraran niveles más altos en la capa profunda, que contiene, mayor porcentaje de carbono (Tabla No. 2).

Los CAH y arcillas de la capa superficial contenían mayor concentración de aluminio, fierro, cromo, cobalto y níquel que estas mismas fracciones en las capas profunda y blanca, ésta última presentó los contenidos más bajos a lo largo de la calicata. Las concentraciones máximas se asociaron a los metales mayoritarios, en los diferentes tipos de arcillas dominantes en la muestra, lo cual se manifestó en los espectros de IR mejor definidos en capas superficiales y profundas con respecto a la blanca (Gráficas No. 9 y 11). Es importante mencionar que en la montmorillonita expresada en contenidos de óxidos se encontró un 66.7 % de  $\text{SiO}_2$ , 28.30% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y 5% de  $\text{H}_2\text{O}$ , lo cual corresponde a la



formula  $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O$  (Vallejo, 1997), a las illitas corresponde un promedio de los siguientes compuestos:  $SiO_2=49.78$ ,  $Al_2O_3=26.346$ ,  $Fe_2O_3=4.30$ ,  $FeO=0.611$ ,  $MgO=2.753$ ,  $CaO=0.32$ ,  $Na_2O=0.245$ ,  $K_2O=7.12$ ,  $H_2O^+=7.12$ ,  $H_2O^-=1.48$  y la fórmula  $(Si_{3.405} Al_{0.06} Al_{1.531} Fe^{3+}_{0.035} Mg_{0.283} (OH)_2O_{10}$  (Vallejo 1997a), la composición ideal de la caolinita difiere de su fórmula estructural  $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ , pues se encontró un 46.5% de  $SiO_2$ , 39.5% de  $Al_2O_3$  y 14.0 de  $H_2O$  (García, 1997) y las haloisitas como la hidrohaloisita tienen la siguiente composición:  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ , con impurezas de  $Fe_2O_3$  en valores de 8.25 a 24%, se denominan ferrihaloisitas.

Finalmente el cadmio, zinc y cobre presentaron concentraciones más altas en las capas profundas, intermedias en capas superficiales y las menores se asociaron a la capa blanca, como correspondería al hecho de que estos metales son más afines a la materia orgánica que los restantes.

Al calcular las diferencias en contenidos de metales entre las fracciones de CAH y arcilla (Tabla No. 14), se observó que en la mayoría de las capas analizadas hubo más retención asociada a la fracción orgánica, el hierro se retuvo de 60~63%, el níquel de 66~72%, el zinc de 62~64%, el cobre de 55~69% y el cobalto de 57~75%; mientras que la arcilla sólo retuvo más aluminio (65~90%) y cromo (50~67%).

Las diferencias de retención al comparar las profundidades de la calicatas mostraron que la arcilla de la capa superficial retuvo mayores porcentajes de aluminio (90%), hierro (53%), cromo (67%), cadmio (67%), níquel (33%) y cobre (45%), mientras que la capa profunda retuvo las menores proporciones de aluminio (66%), cadmio (38%) y níquel (28%) y la capa blanca 37% de hierro y 31% de cobre. El zinc no mostró diferencias de distribución a distintas profundidades, fluctuó entre 36 y 37%.

En los CAH se observaron comportamientos inversos, ya que en la capa superficial se encontraron los menores porcentajes de retención de aluminio (10%), hierro (47%), cromo (33%), cadmio (33%), níquel (67%), mientras que en la capa blanca se retuvieron mayores porcentajes de hierro (63%) y cromo (50%) al igual que en la capa profunda cadmio (63%) y níquel (72%). El zinc se conservó en porcentajes semejantes en toda la calicata (63-64 %).

Tabla No. 14 Contenido en metales totales de las fracciones arcilla y complejo arcilla humus extraídas del suelo de San Gregorio Atlapulco.

Muestra	Fracción	Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
C56 10-20 capa superficial	CAH	40130	8	15370	6	6	39	95	40
	Arcilla	36215	2	8180	4	4	13	35	18
C56 140-142 capa blanca	CAH	8417	5	5778	4	2	12	51	26
	Arcilla	6212	3	2117	2	1	4	19	8
C56 190-200 capa profunda	CAH	23318	7	10989	5	8	29	184	58
	Arcilla	15321	3	4386	3	3	8	66	18

mg kg<sup>-1</sup>

### 7.2.8. Concentración de polisacáridos en las fracciones de arcilla y complejos arcilla humus.

La concentración de polisacáridos tanto totales como lábiles en las fracciones separadas por tamaño muestran que los CAH tienen mayores porcentajes que las arcillas, en la capa profunda se encontraron los máximos contenidos con respecto a la capa superficial y la blanca, mostrando esta última valores intermedios, exceptuando al CAH.

Se observó que los polisacáridos lábiles fueron predominantes, pues los índices totales/lábiles conservaron valores bajos, excepto en la arcilla de la capa superficial, que

mostró concentraciones mínimas de polisacáridos lábiles, lo cual se atribuyó al efecto protector de la arcilla, al promover una alta resistencia a la degradación de polisacáridos, Este efecto también se observó en los índices de las arcillas libres de materia orgánica, pues fueron mayores que los encontrados en CAH, debido a que se incrementaron los porcentajes de polisacáridos asociados a la arcilla e impidieron su rápida mineralización.

Esto también se asoció a lo encontrado por análisis de microsonda del liofilizado del extracto de polisacáridos totales, pues las capas superficial y profunda que incluyeron mayores porcentajes de fierro y aluminio mostraron valores menores de polisacáridos lábiles (Tabla No. 15).

Los porcentajes de metales totales en muestras liofilizadas (Tabla No. 16) fueron variables en el CAH de las capas superficial y profunda, encontrándose unicamente magnesio, calcio, fierro y aluminio, mientras que en arcillas superficiales y en las fracciones con y sin materia orgánica de la capa blanca además de estos se encontraron potasio, fósforo, titanio y silicio. La presencia de titanio es frecuente como un contaminante de caolinitas, pudiendo oscilar desde 0.5% ~ 3.5% de  $TiO_2$ , la presencia de fósforo no es rara, puesto que existen azúcares fosfatados y el silicio fue dominante tanto en la fracción CAH como en arcilla obtenida de la capa blanca debido a su constitución botánica sugerida por el hecho de que cerca del 40% en peso son fitolitos (García-Calderón, comunicación personal). El magnesio fue más evidente en CAH, al igual que el calcio, mientras que el fierro y aluminio se concentraron más en las arcillas, el fósforo tuvo comportamientos irregulares, pues su contenido fue mayor en el CAH de la capa blanca, mientras que en la capa superficial y profunda sólo fue detectado en la arcilla, el potasio sólo se encontró en extractos de polisacáridos de la arcilla de la capa superficial y en CAH y arcilla de la capa

blanca. Los contenidos de magnesio en estos liofilizados al comparar capas superficial, blanca y profunda fueron mayores en esta última y menores en la blanca, mientras que en la arcilla la capa superficial mostró las concentraciones más altas, la profunda intermedia y la blanca conservaron los rangos menores. El calcio, fierro y aluminio mostraron las mayores concentraciones en la capa superficial, intermedios en la profunda y los más bajos valores se dieron en la capa blanca.

Tabla No. 15. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en las fracciones arcilla y complejos arcilla humus del suelo de San Gregorio Atlapulco.

Muestra	Fracción	Tipo de polisacárido	Concentración de polisacáridos g 100 g <sup>-1</sup>	Relación polisacáridos totales/ polisacáridos lábiles
C56 10-20 capa superficial	CAH	Totales	0.62	1.77
		Lábiles	0.35	
	Arcilla	Totales	0.36	9.00
		Lábiles	0.04	
C56 140-142 capa blanca	CAH	Totales	0.54	1.25
		Lábiles	0.43	
	Arcilla	Totales	0.39	1.95
		Lábiles	0.20	
C56 190-200 capa profunda	CAH	Totales	0.81	1.21
		Lábiles	0.67	
	Arcilla	Totales	0.42	2.00
		Lábiles	0.21	

Tabla No. 16 Análisis mediante microsonda del liofilizado de polisacáridos totales en las fracciones arcilla y complejo arcilla humus del suelo de San Gregorio Atlapulco.

Muestra	Fracción	Mg	Ca	Fe	Al	K	P	Ti	Si
C56 10-20	CAH	53.94	4.57	15.59	25.89				nd
capa superficial	Arcilla	23.00	3.54	18.91	32.32	0.95	16.30	4.59	nd
C56 140-142	CAH	25.15	2.13	9.13	2.11	0.12	10.15	0.12	51.09
capa blanca	Arcilla	18.15	1.02	3.12	1.20	0.10	5.13	0.10	71.18
C56 190-200	CAH	62.13	3.26	10.15	19.23				nd
capa profunda	Arcilla	17.15	2.29	8.15	39.40		6.15	2.15	24.71

#### 7.2.9 Análisis de espectros de difracción de rayos X e infrarrojo de arcillas y complejos arcilla humus.

El análisis por difracción de rayos X se realizó únicamente en las capas superficiales de la calicata (Gráficas No. 11 y 12), la muestra desorientada presentó picos entre la región de valores  $d(hkl)$  de 1.78 a 10.49 Å, las reflexiones 4.41, 4.06, 3.90 y 3.76 Å se asociaron a presencia de feldspatos potásicos o sódicos, los picos a 3.65, 3.36, 3.22, 3.20 y 3.02 Å corresponden a micas, y los máximos picos 2.52, 2.44, 2.15 y 1.78 Å se asociaron a serpentinas tipo bertierina, lizardita o antigorita, que son silicatos 1:1 de estructura análoga a la caolinita, pero que contienen en la capa octaédrica otros iones de sustitución como el magnesio, fierro o níquel. El pico a 1.87 Å se asocia a cristobalita y a 1.82 Å a la jarosita  $KFe_3(OH)_6(SO_4)_2$  (Dixon, 1989).

A su vez existe gran cantidad de material amorfo, el cual se evidenció por la presencia de señales asimétricas algunas muy anchas como la 4.41 y 2.15 Å.

Cuando se analizó la muestra en el agregado orientado el espectro abarcó valores entre 1.87 y 7.48 Å; el único punto diferente que apareció fue el de 6.64 Å que corroboró la presencia de feldespatos, la señal 4.06 fue muy ancha lo que denotó presencia de materiales amorfos, cuando se saturó con etilenglicol los valores variaron de 3.20 a 10.60 Å, la 7.48 Å mejoró su simetría con respecto a las muestras desorientadas y orientadas y puede corresponder a la presencia de haloisita o esmectita, la señal 6.13 Å que no se había manifestado, se asoció a haloisita ó a feldespatos.

El calentamiento de los agregados a temperaturas entre 300 y 500 °C mostraron que los picos 3.22, 3.20, 3.36, 3.76, 4.06 y 7.40 Å conservaron su simetría e incluso mostraron intensidad incrementada, debido a que son características de micas y feldespatos, minerales que resisten altas temperaturas, también se observaron en MET y MEB (Figuras No. 7 y 8).

Al comparar con diagramas de difracción de rayos X de montmorillonitas, se observó que varias bandas estuvieron ligeramente desplazadas debido a las variables en la cristalinidad dadas por los diferentes orígenes de los suelos estudiados, sin embargo conservaron algunas señales cercanas, como 2.15, 2.44, 2.52, 3.02, 3.36, 4.41, y 7.48 Å que aparecen de forma más evidente en la muestra desorientada, orientada y con etilenglicol, disminuyendo a altas temperaturas, lo que corroboró que fueron propias de montmorillonita.

Además los espectros de infrarrojo de las arcillas (Gráfica No.10) mostraron diferentes bandas específicas de la montmorillonita tales como la de 3700  $\text{cm}^{-1}$  que corresponde a grupos OH estructurales internos (OH unidos) y, puesto que apenas es perceptible se deduce que el tratamiento para la liberación de la materia orgánica fue drástico y ocasionó alteraciones separando los diferentes grupos OH unidos, la de 3400  $\text{cm}^{-1}$

<sup>1</sup> de grupos OH provenientes de moléculas de agua, la 1630  $\text{cm}^{-1}$  relacionadas con moléculas de agua disociadas H-O-H, la 1100 y 1056  $\text{cm}^{-1}$  como bandas específicas de vibraciones de tensión Si-O y las 915, 845, 630, 525,  $\text{cm}^{-1}$  y 467  $\text{cm}^{-1}$  relacionadas con enlaces Si-O-Al, por tanto se puso en evidencia que la arcilla de este suelo de San Gregorio Atlapulco puede ser del grupo de las esmectitas.

En todos los espectros de infrarrojo de arcillas y CAH la banda 801-845  $\text{cm}^{-1}$  fue muy simétrica, se asoció a la presencia de polimorfos de sílice como el ópalo C, el ópalo CT y el ópalo A (Figura No.9). En arcillas, la señal a los 630  $\text{cm}^{-1}$  corresponde a la presencia de cristobalita (Figura No.10) y ópalo C. Las de 460-470  $\text{cm}^{-1}$  y 1100  $\text{cm}^{-1}$  se asociaron al ópalo A de origen biogénico. El ópalo es un amorfo hidratado de sílice que incluye material proveniente de diatomeas, rocas de origen biogénico y sílice inorgánico, su nombre se asocia a orígenes y morfologías determinadas, sin embargo no tiene necesariamente estructuras cristalinas, el tipo A ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) está constituido de múltiples biolitos, en los que se incluyen estructuras silíceas con formas y tamaños característicos que se depositan o son secretados por plantas y animales (Dixon, 1989).

En la mayoría de los suelos la presencia de ópalo se pone de manifiesto en pequeñas cantidades de 1 a 30  $\text{g kg}^{-1}$ , sin embargo existen algunos con considerables cantidades de ópalo asociado en forma de fitolitos que pueden llegar a representar de 500 a 750  $\text{g kg}^{-1}$ . Las características de las chinampas respecto a su forma de construcción, manejo agrícola y ubicación cerca de un lago, hacen probable la presencia de este tipo de polimorfo de sílice en concentraciones considerables, se han publicado contenidos de 30 y 40  $\mu\text{g}$  de Si/litro dentro de lagos eutróficos con un máximo crecimiento de diatomeas (Werner, 1977). El ópalo A esta constituido en promedio de los siguientes compuestos:  $\text{SiO}_2$  764~905  $\text{g kg}^{-1}$ ,

$\text{Al}_2\text{O}_3$  8.4–47 g  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de 1.8–13 g  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{TiO}_2$  trazas~3.0 g  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{CaO}$  <1-20.4 g  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  1.4–9.7 g  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  de 1.0–34.4 g  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{MgO}$  trazas~17.2 g  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{C}$  8.6 g  $\text{kg}^{-1}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  42.6-121 g  $\text{kg}^{-1}$  (Dixon, 1989).

En el espectro de IR de la capa blanca (Gráfica No. 10) hay menor número de bandas específicas para la montmorillonita pues sólo se definieron las bandas de 3700 y 3400  $\text{cm}^{-1}$ , un débil hombro cercano a 1630  $\text{cm}^{-1}$ , la banda a 1095  $\text{cm}^{-1}$  y la de 467  $\text{cm}^{-1}$ .

Sin embargo en los espectros de IR también hubo definición de bandas características de caolinita, tales como la 959 y 801  $\text{cm}^{-1}$  y la zona cercana a los 3700  $\text{cm}^{-1}$  en todas las capas analizadas es difusa, lo que es característico de haloisitas, puesto que su estructura es más desordenada, la capacidad de intercambio catiónico de estas arcillas varía de 10 a 50  $\text{cmol}$  (+)  $\text{kg}^{-1}$ , cuando están hidratadas, acordes con los resultados de CICT en la fracción arcilla extraída de estas capas blancas (Tabla No. 13). Y también en MEB y MET se observaron morfologías características de montmorillonita, caolinita y haloisita (Figuras No. 11–20), por lo que se deduce que en este suelo existen mezclas de los tres tipos de arcilla, siendo predominante en las capas superficial y profunda, la montmorillonita, y en la blanca, la caolinita y haloisita.

Teniendo en cuenta los espectros de difracción de rayos X de la capa superficial 0-10 cm (Gráfica No. 11), también es probable la existencia de illita, puesto que existen señales típicas a 10.49, 7.48, 4.41, 4.06, 3.36, 3.22, 3.20, 2.52, 2.95, 2.44, 2.15, 1.94, y 1.78 Å, muchas de las cuales desaparecieron o mostraron menor intensidad cuando se saturó con etilenglicol, lo que se puede deber a que las illitas no son expandibles (Vallejo, 1997).

La illita pudo originarse de transformaciones de micas o de esmectitas, también aparece como producto intermedio en la alteración de feldespatos potásicos a caolinita,



además de ser un mineral muy abundante en la mayoría de los suelos (Ford, 1984). También su morfología al MET es semejante a la de caolinita (Figuras No. 15 y 16) y a la de la montmorillonita en MEB (Figuras No.11 y 14), caracterizada por simetrías hexagonales o cercanas a esta . Aunque no se ha reportado en estos suelos es muy posible su existencia. Los espectros de IR (Gráfica No. 10) son muy semejantes a los de illitas reportadas unicamente la banda  $1630\text{ cm}^{-1}$  apareció ligeramente desplazada y se consideró equivalente a la de  $1650\text{ cm}^{-1}$ , mientras que las de 3400-3500, 1100, 959, 915, 845, 800, 630, 525,  $467\text{ cm}^{-1}$  mostraron inteensidades dentro de valores normales de illitas.

Los espectros de difracción de rayos X de la capa superficial de 0-10 cm (Gráfica No. 11), determinaron mayor cristalinidad que la de 10-20 cm (Gráfica No. 12), esta última arcilla en polvo desorientado mostró señales de 1.45 a 7.43 Å, la de 4.46 a 3.90 Å se asocia a feldespatos, la de 3.22 Å corresponde a micas, las de 2.53, 2.15 y 1.78 Å fueron específicas de serpentinas tipo bertierina, lizardita o antigorita, la 2.53 Å también se asocia a oxidos de fierro como la magnetita o maghemita. Las bandas 7.43, 4.46, 4.06, 3.22, 2.53, 2.15 y 1.78 Å, aparecen dentro de rangos semejantes publicados para illitas y las de 2.15, 2.53, 4.46, 7.43 Å para montmorillonitas.

El agregado orientado mostró las mismas vibraciones que en polvo desorientado excepto la de 3.90 y 1.45 Å. En agregado con etilenglicol apareció el pico 10.88 Å con ligera mejoría en su simetría, característica de la montmorillonita.

Los agregados sometidos a altas temperaturas 300 y 500 °C, mostraron unicamente señales mejor definidas a 4.06, 3.20 y 3.22 Å, aunque fueron de menor tamaño que las encontradas en etilenglicol, en polvo desorientado y en agregado orientado, lo que implicó

que parte de estas señales fueron provenientes de arcilla montmorillonita o illita y otra predominante de minerales como las micas o feldespatos.

Aunque los difractogramas son poco precisos para la determinación del tipo de arcilla, la presencia de feldespatos, micas amorfos y polimorfos de sílice como el ópalo A queda perfectamente establecida. Al complementar los resultados de difracción de rayos X con la mejor definición de bandas en los espectros de IR se concluyó que las arcillas extraídas de las capas superficiales (Gráficas No. 9~12) son principalmente montmorillonitas e illitas, mientras que la caolinita y haloisita están presentes en menores concentraciones.

La formación *in situ* de las arcillas mencionadas es factible en la zona chinampera, por ejemplo la caolinita aparece como producto de meteorizaciones de feldespatos, pasando por estados intermedios caracterizados por la presencia de illita. También la caolinita puede formarse a partir de haloisita si se da una meteorización intensa, pasando por fases amorfas, con pérdida parcial de sílice, por lo que los espectros de difracción de rayos X aparecen poco definidos. Sin embargo, la caolinita se puede formar por envejecimiento y reordenamiento estructural de haloisita, sin pasar por estados amorfos intermedios; también se han estudiado procesos en suelos derivados de cenizas volcánica, donde el alófono evoluciona de caolinita a gibsita, pasando por haloisita; las zonas volcánicas circundantes al área lacustre como la de la Sierra del Chichinautzin pudieron dar origen a materiales alofánicos que se transportaron (Ford, 1994; Mooser, 1963).

La presencia de feldespatos ordenados pudo dar lugar a una secuencia de formación de illita-caolinita, mientras que los desordenados dieron lugar a la siguiente serie: feldespatos- esmectita desordenada- caolinitas (o haloisitas).

Las esmectitas se asocian a magnesio que ingresa a cuerpos de agua por rocas básicas como los basaltos que se meteorizan liberando minerales ferromagnesianos, por lo que se considera que las esmectitas en la mayoría de los suelos son neoformadas, aunque en ocasiones pueden formarse a partir de micas; sin embargo su incidencia debe ser muy intensa, por lo que es poco factible en esta zona el proceso. Las características no bien definidas en los difractogramas para montmorillonitas, se atribuyeron precisamente a este origen, pues los minerales que sirven de precursores tienen que ver mucho con las características específicas de las arcillas, así por ejemplo, si provino de materiales desordenados como pudieran ser los feldespatos alterados este desorden se conservó cuando las condiciones promovieron la formación de arcillas.

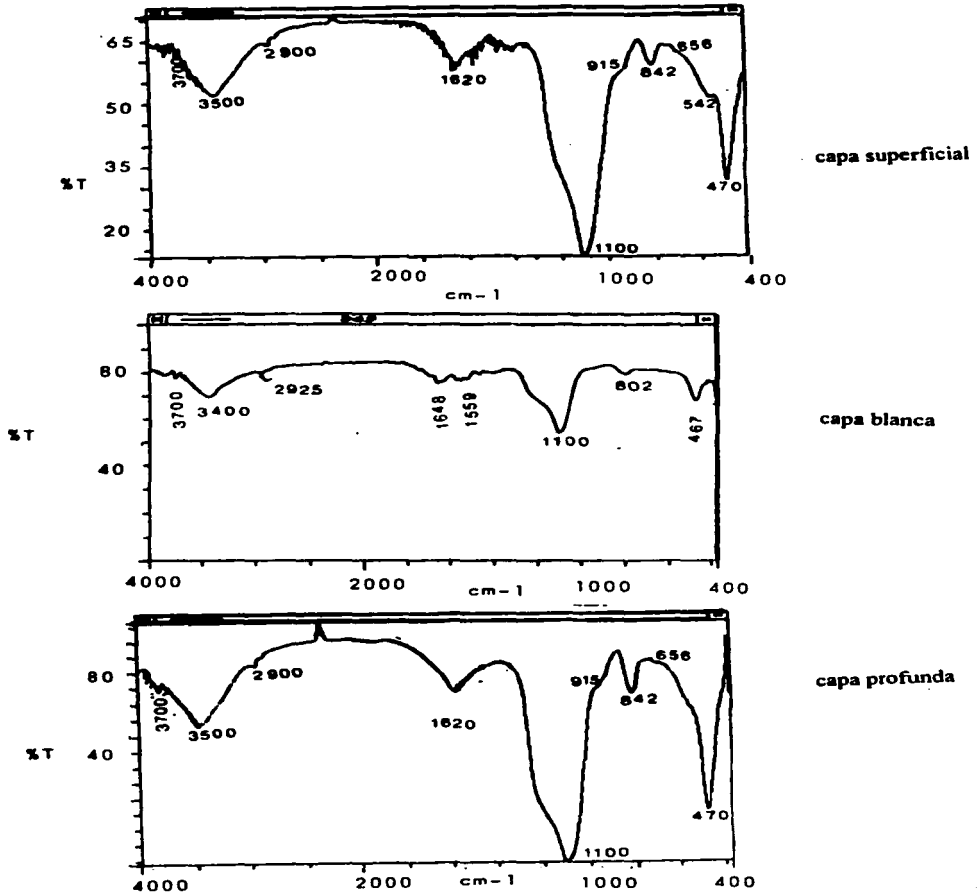
Finalmente, la presencia de illitas también debió darse por neoformación, pues se ha encontrado que es escasa en suelos donde los feldespatos aparecen abundantemente (Ford, 1984).

En lo que se refiere a los espectros de IR de los CAH, mostraron bandas semejantes a los de arcillas (Gráficas No. 9 y No. 10), siendo más definidas la mayoría en estas últimas (3400, 1100, 630 y 525  $\text{cm}^{-1}$ ), pues el material orgánico enmascaró algunas señales como la de 1400 y 1630  $\text{cm}^{-1}$ , así también aparecieron algunas más como la de 2920  $\text{cm}^{-1}$  y la de 1550  $\text{cm}^{-1}$ , la primera es característica de la tensión de grupos C-H alifáticos asociados a proteínas; la de 1550  $\text{cm}^{-1}$  se asoció a grupos  $\text{COO}^-$  simétricos y deformaciones N-H. Un ligero hombro de igual intensidad en CAH y arcillas a 915  $\text{cm}^{-1}$  y la 842-845  $\text{cm}^{-1}$ , más evidente en CAH definió enlaces Al-Mg-OH, la banda 467  $\text{cm}^{-1}$  característica de grupos Si-O-Al resultó más definida en CAH de las capas profunda y superficial, mientras que en

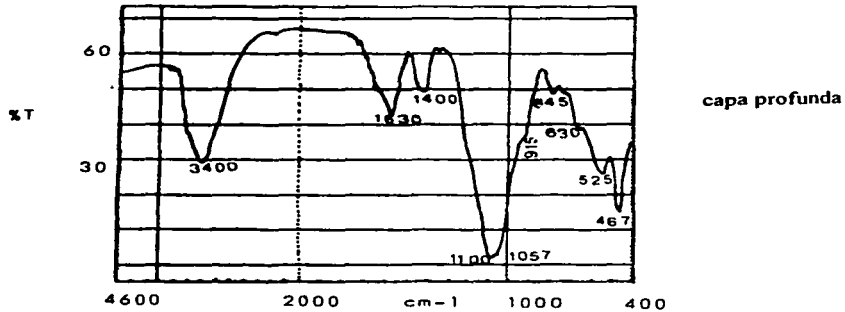
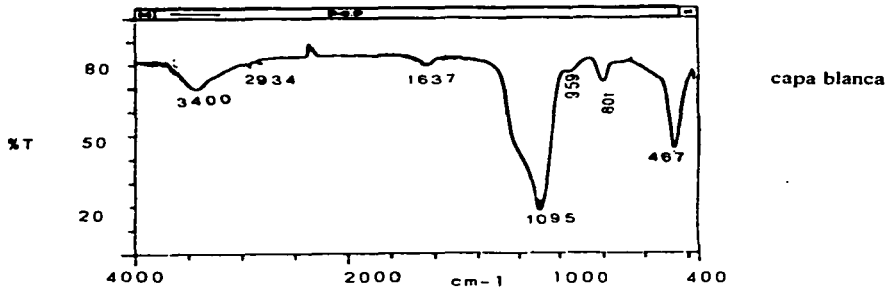
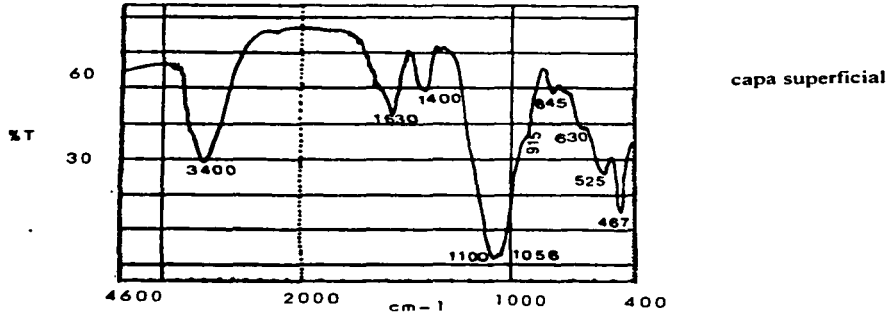
la capa blanca se manifestó en la fracción de arcilla, por lo cual se asoció a la sílice de minerales arcillosos.

Las bandas en los espectros de IR (Gráficas No. 9 y 10) de las capas superficial y profunda fueron más numerosas y de mayor intensidad que las encontrados en la capa blanca, lo cual estableció que esta última, tuvo menor grado de cristalinidad.

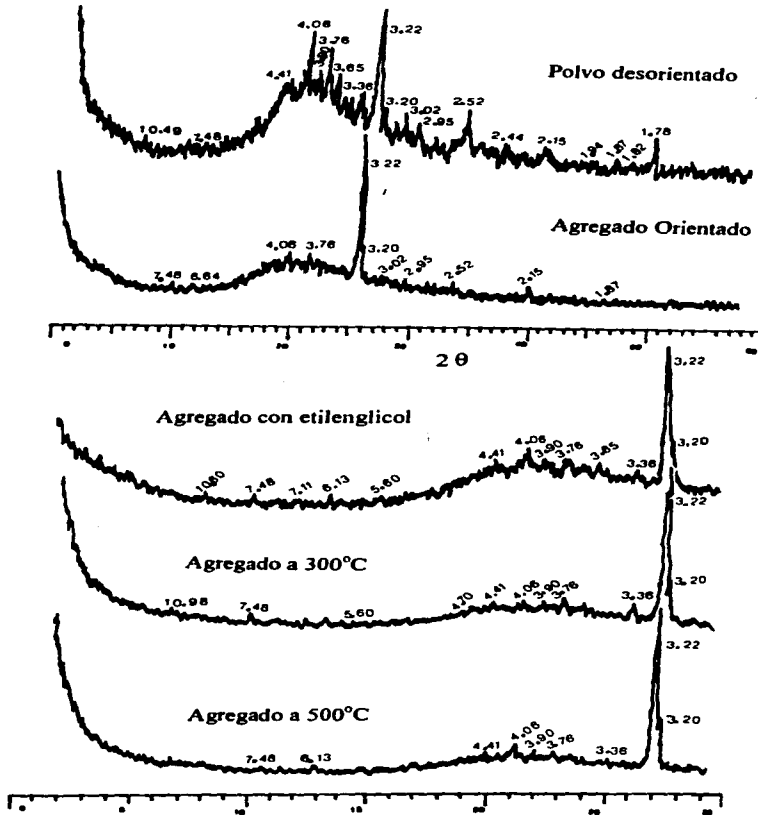
Gráfica No. 9. Espectros de infrarrojo de los complejos arcilla humus del suelo de San Gregorio Atlapulco.



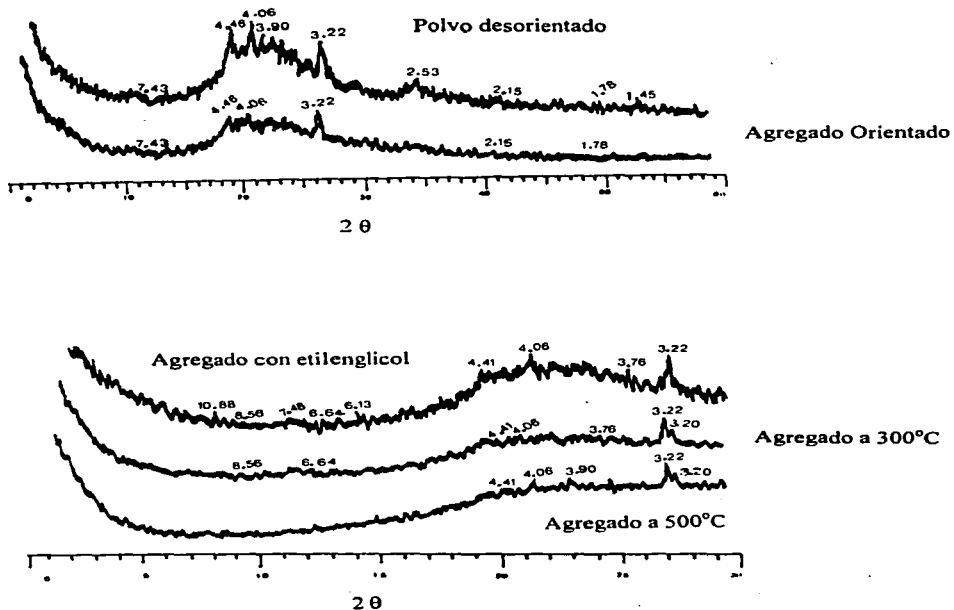
Gráfica No. 10. Espectros de infrarrojo de arcillas del suelo de San Gregorio Atlapulco.



Gráfica No. 11. Espectros de difracción de rayos X en la arcilla de la capa superficial (0-10 cm) del suelo de San Gregorio Atlapulco



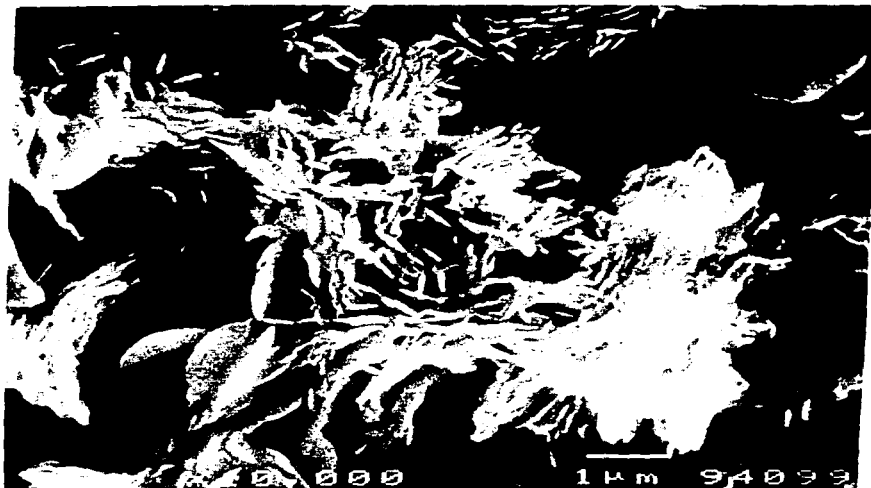
Gráfica No. 12 Espectros de difracción de rayos X de la arcilla de la capa superficial (10-20 cm) del suelo de San Gregorio Atlapulco.





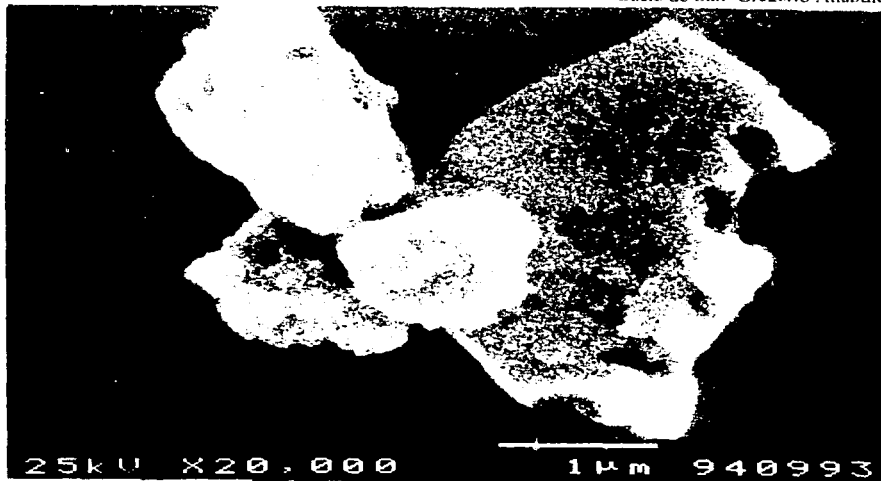


7

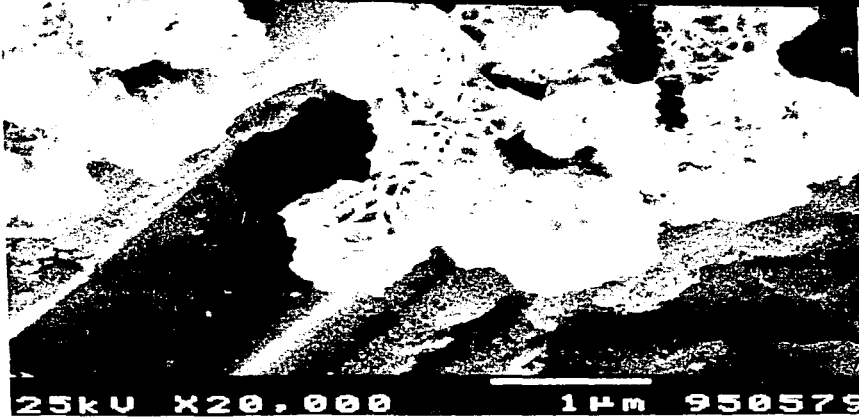


8

Figura No.7. Mica observada en microscopio electrónico de transmisión., 100,000 aumentos. Figura No.8 Feldspatos observados en MEB extraídos del suelo de San Gregorio Atlapulco.

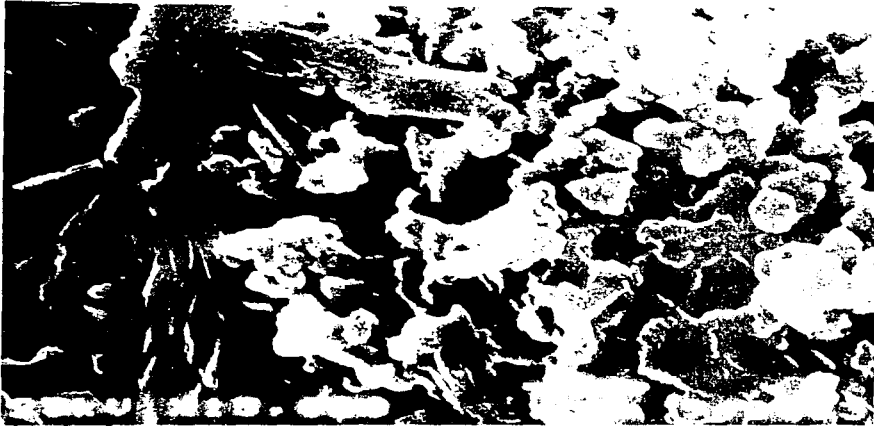


9



10

Figura No.9. Opalo A . Figura No.10. Cristobalita extraídos del suelo de San Gregorio Atlapulco.

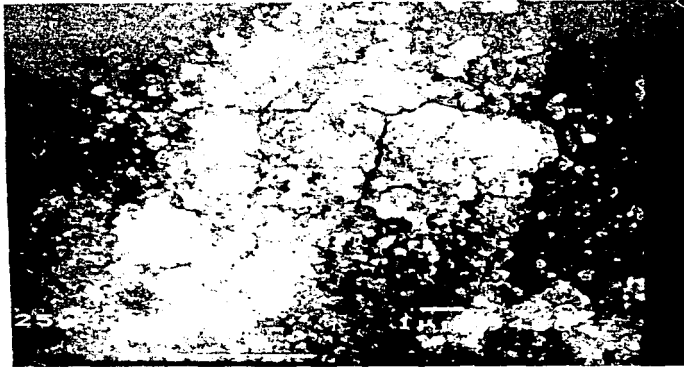


11



12

Figura No. 11 y Figura No. 12. Montmorillonita del suelo de San Gregorio Atlapulco.



13

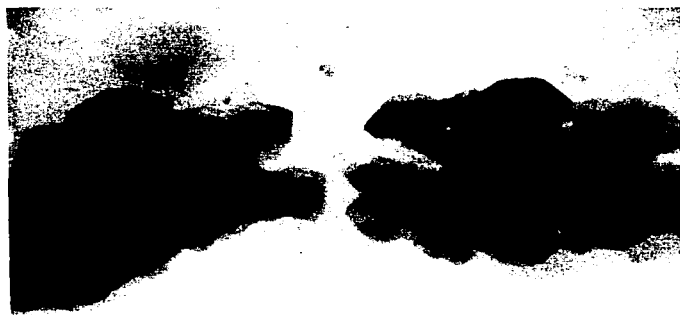


14

Figura No. 13. Agregado de arcilla montmorillonita. Fotografía No.14. Hojuelas de montmorillonita, provenientes del suelo de San Gregorio Atlapulco.

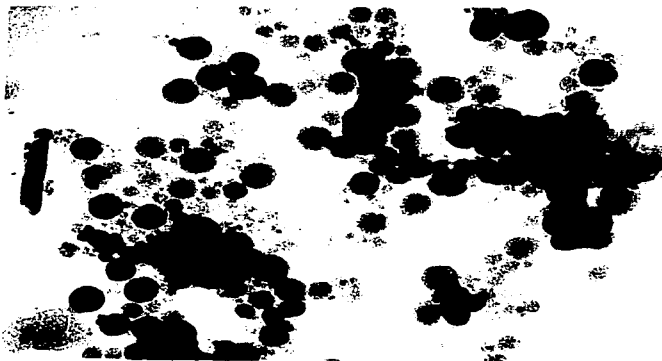


15



16

Figura No. 15 y Figura No.16. Morfología observada en MET de arcilla tipo caolinita encontrada en el suelo de San Gregorio Atlapulco.(Fig. superior, 100,000 aumentos, Fig. inferior 50,000 aumentos.)

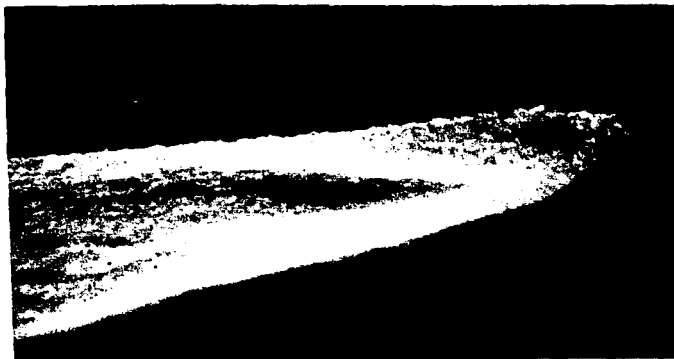


17

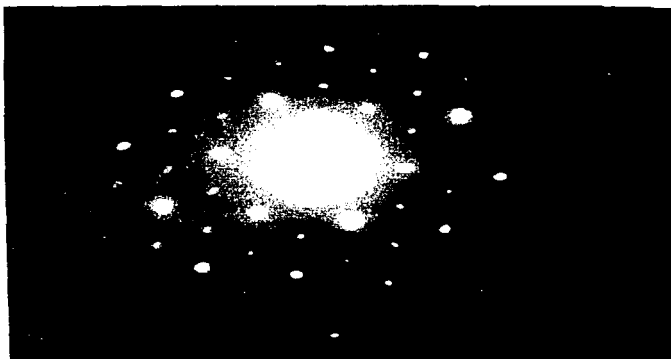


18

Figura No. 17. Haloisita globular. Figura No.18. Haloisita tubular encontradas en el suelo de San Gregorio Atlapulco.(Fig. superior 100,000 aumentos, Fig inferior 50,000 aumentos)



19



20

Figura No.19 Haloisita al MET. 100, 000 aumentos. Figura No.20. Patrón de difracción de rayos X de la haloisita de la Fig. No.19.

### **7.3. Suelo de San Luis Tlaxiatalmalco.**

#### **7.3.1. Características físicas y químicas.**

##### **7.3.1.1. Color.**

Los colores característicos de esta calicata se enmarcan dentro del color espectral 7.5 YR referido al código internacional Munsell, la capa superficial presentó el grado más oscuro (7.5 YR 2/0) que las capas blanca y profunda que fueron cercanas al gris en húmedo (7.5 YR 6/0) y al blanco (7.5 YR 6/0) en seco (Tabla No.17), estos colores se asociaron al porcentaje de materia orgánica, pues disminuyó el grado del color al aumentar el contenido en materia orgánica. Los colores blancos por su parte son debidos a la presencia de la sílice de diatomeas incorporadas a las capas.

##### **7.3.1.2. Textura.**

La textura es franca, los porcentajes de arena y arcilla aumentan con la profundidad de la calicata (Tabla No. 17, Gráfica No 14). Por el contrario el contenido de limo total en el que predomina el limo medio disminuye.

##### **7.3.1.3. Densidad aparente y real.**

Las densidades aparente y real mostraron rangos característicos de suelos orgánicos correspondiendo los valores más altos a la superficie del suelo y la disminuyendo con la profundidad (Tabla No. 17), lo que se atribuyó al contenido de materia orgánica en la superficie y al número de diatomeas en las capas más profundas. La porosidad rebasó el 70% y es mayor en capas constituidas por diatomeas, lo que corrobora que los polimorfos



de sílice incrementan la microporosidad por los múltiples intersticios que promueven el desorden de estos minerales, lo que consecuentemente disminuye de forma notable la densidad aparente (Tablas No.17).

#### **7.3.1.4. Reacción del suelo.**

Los valores de pH relación 1:5, cercanos a la neutralidad son más altos en las capas profunda y superficial. En todas las capas son semejantes los pHs determinados en la pasta de saturación variando de 0.4 unidades explicable, por la presencia de coloides orgánicos acidificantes.

#### **7.3.1.5. Materia orgánica, carbono y nitrógeno.**

Los porcentajes de materia orgánica, carbono y nitrógeno, así como las relaciones C/N del suelo de San Luis Tlaxialtemalco mostraron los valores más altos en su capa superficial, intermedios en la capa profunda y menores en la capa blanca (Tabla No. 18).

Los altos valores de nitrógeno en toda la calicata implicaron actividad microbiana potencial, pudiendo asociarse en las chinampas al igual que en los suelos hidromorfos a la preservación selectiva de proteína, la cual genera relaciones C/N bajas, sin embargo el nitrógeno será activo hasta que el suelo se drene.

De acuerdo con los resultados de nitrógeno, la capa superficial mostró una relación C/N más baja que la capa blanca y profunda, atribuible además, a su íntima asociación con las raíces de los cultivos, al origen de la capa blanca que implicó sequía y a la anaerobiosis generada en la capa profunda por su cercanía con el manto freático.

#### **7.3.1.6. Fósforo.**

Los contenidos de fósforo de 32.20~248 kg ha<sup>-1</sup> conservaron la misma relación que el carbono y nitrógeno a lo largo de su profundidad, por tanto hay dependencia del porcentaje de materia orgánica acumulada. La disponibilidad de fósforo debió ser adecuada y óptima, pues el pH casi neutro la favorece.

#### **7.3.1.7 Iones intercambiables**

Los resultados del análisis de iones intercambiables en toda la calicata (Tabla No. 18) muestran que el contenido de magnesio predomina sobre el de calcio, evidente en la relación Ca:Mg menor de 1; se asocia al material parental y al contenido vegetal.

El magnesio y el calcio se encontraron en mayor concentración en la capa superficial, presentando valores intermedios en la capa profunda y los más bajos en la capa blanca (Tabla No.18).

El contenido en potasio bajo en general, es mayor en la capa superficial, intermedio en la capa profunda y correspondiendo la menor concentración a la capa blanca del suelo (Tabla No.18), de ahí que los índices Ca:K sean elevados, destacando por su mayor valor la capa blanca, ( el calcio supera 37 veces el contenido de potasio), mientras que en la capa superficial el calcio es 25 veces más abundante que el de potasio y en la capa profunda 23 .

El sodio se acumula más en la capa profunda y menos en la capa blanca (Tabla No.18), lo que se justifica por la proximidad del manto freático a la capa profunda y al agua del lago que contiene iones sodio que le dan una calidad C<sub>3</sub>S<sub>1</sub> .

Las relaciones K:Na mayores contenidos de sodio que de potasio, lo que fue más evidente en las capas blanca y profunda, pues el sodio alcanzó contenidos 10 veces mayores que el potasio.

El PSI, por lo tanto, fue menor de 15, su valor aumentó conforme se acercó al nivel freático, el suelo por estos valores y por los de conductividad eléctrica se considera como exento de problemas de salinidad y sodicidad.

La CICT (Tabla No.18) fue más alta en la capa superficial, intermedia en la capa profunda y menor en la capa blanca, por tanto se relacionó de forma directa a los contenidos de materia orgánica (Tabla No. 17).

Los PSB mostraron valores elevados entre 90 y 100% (Tabla No.18) atribuible al contenido de arcilla y materia orgánica (Tabla No. 17), lo que implica riqueza de nutrientes, que se refleja en el óptimo desarrollo del cultivo de maíz cultivado en la chinampa.

#### **7.3.1.8. Conductividad eléctrica y iones solubles.**

De los resultados de CE (Tabla No.19) se deduce que los suelos son aptos para el desarrollo agrícola. resultados correspondientes a los iones solubles calcio, magnesio, sodio, potasio y a los iones intercambiables, son más elevados en la superficie del suelo y menores en la capa blanca, conservando la capa profunda valores intermedios. También se aprecia mayor concentración de aniones cloruro, bicarbonato y sulfato en la capa profunda, intermedia en la capa superficial, correspondiendo la menor concentración a la capa blanca. La relación de adsorción de sodio en toda la calicata fue constante, oscilando alrededor de un 2%.

La suma de cationes es mayor que la de aniones (Tabla No.19), hay una diferencia de 14 cmol (+) L<sup>-1</sup> en las capas superficial y profunda, mientras que en la capa blanca sólo fue de 4 cmol (+) L<sup>-1</sup>. la abundancia de materia orgánica enriqueció el contenido de nutrientes con carga positiva.

Las favorables propiedades químicas y bioquímicas de este suelo y su elevada actividad microbiana (que libera los nutrientes por biodegradación) determina su alta fertilidad.

#### **7.3.1.9. Metales totales.**

El análisis de los metales totales en este suelo (Tabla No.20) mostró en la capa superficial resultados más altos y en la capa blanca los menores, lo que se atribuyó a que llegan de forma más directa y en mayor proporción por el uso del agua de riego, en la que se encuentran disueltos y al interactuar con los altos porcentajes de materia orgánica, experimentan procesos de retención.

El aluminio y el fierro fueron predominantes, debido a que son constituyentes principales de minerales ferromagnesianos y de arcillas. El zinc, cobre y níquel aparecieron en concentraciones más elevadas que el cromo, cadmio y cobalto; sin embargo todos conservaron concentraciones no tóxicas, a excepción de la capa superficial en la que el cadmio, rebasó el valor de 1 mg kg<sup>-1</sup> (Alloway, 1990).

El alto porcentaje de materia orgánica debió promover la formación de organominerales donde el aluminio y fierro participaron mayoritariamente, mientras que el zinc, cobre y níquel, experimentaron menor asociación.

Tabla No. 17. Características físicas y químicas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

Muestra	Color en seco	Color en humedo	DR gcc <sup>-1</sup>	DA gcc <sup>-1</sup>	Porosidad	% Arena	% Limo fino	% Limo medio	% Limo grueso	% Limo total	% Arcilla	pH KCl 1:5	pH H <sub>2</sub> O 1:5	% M.O
C63 10-20 capa superficial	7.5 YR 6/0 Gris	7.5 YR 2/0 Negro	2.03	0.54	73.40	30.75	15.43	23.41	8.51	47.35	21.89	7.1	7.3	11.5
C63 80-90 capa blanca	7.5 YR 8/0 Blanco	7.5 YR 6/0 Gris	1.98	0.23	88.38	32.75	24.97	17.37	1.08	43.42	23.82	6.8	7.0	2.75
C63180-190 capa profunda	7.5 YR 8/0 Blanco	7.5 YR 6/0 Gris	1.89	0.30	84.13	34.60	17.49	13.03	9.76	40.28	25.12	6.7	7.4	6.69

Misma leyenda que la Tabla No.1

Gráfica No. 13. Distribución granulométrica de muestras edáficas superficiales, intermedias y profundas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

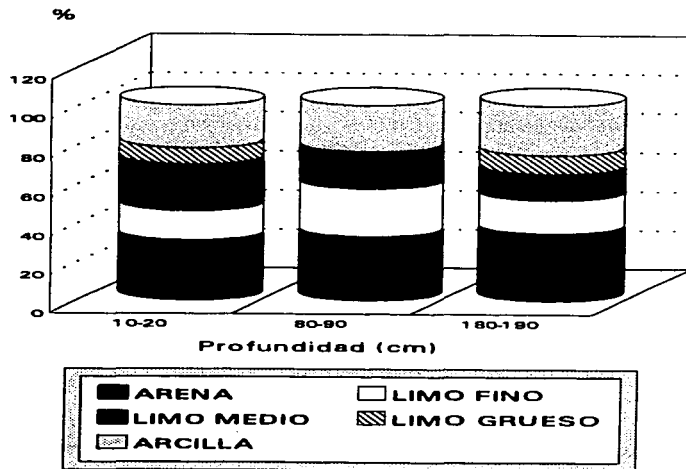


Tabla No.18. Contenidos de carbono, nitrógeno, fósforo, iones intercambiables, CICT y sus diferentes relaciones en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

Muestra	cmol(+) kg <sup>-1</sup>													
	%C	%N	C:N	% P	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CICT	Ca:Mg	Ca:K	K:Na	PSI	PSB
C63 10-20 capa superficial	6.67	0.71	9.39	0.023	18.72	26.12	3.12	0.74	49.70	0.72	25.30	0.24	6.28	97.98
C63 80-90 capa blanca	1.59	0.37	4.30	0.007	10.10	16.29	2.74	0.27	31.96	0.62	37.41	0.10	8.57	91.99
C63180-190 capa profunda	3.88	0.60	6.47	0.019	12.15	17.24	4.88	0.51	38.46	0.70	23.82	0.10	12.69	90.43

Misma leyenda que la Tabla No.2.

Tabla No. 19. Características químicas de la pasta de saturación, iones solubles, suma de cationes y aniones en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

Muestra	cmol (+) L <sup>-1</sup>												
	CE dSm <sup>-1</sup>	pH pasta	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>+2</sup>	RAS	Σ cationes	Σ aniones
C63 10-20 capa superficial	2.70	7.6	8.67	12.76	7.27	1.10	3.75		7.50	4.01	2.22	29.80	15.26
C63 80-90 capa blanca	2.00	7.2	2.10	6.12	5.38	0.50	2.77		5.55	2.97	2.65	14.10	11.29
C63180-190 capa profunda	3.40	7.6	10.86	13.10	9.16	0.67	4.72		9.44	5.05	2.65	33.79	19.21

Misma leyenda que la Tabla No. 3.

Tabla No. 20. Concentración de metales totales en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

Muestra	mg kg <sup>-1</sup>							
	Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
C63 10-20 capa superficial	12140	3	6128	2	3	18	45	22
C63 80-90 capa blanca	62	1	116			8	15	10
C63180-190 capa profunda	6586	2	974	2	1	12	27	19

nd = no detectable

### **7.3.2. Evolución de las fracciones orgánicas.**

#### **7.3.2.1. Fraccionamiento de la materia orgánica.**

Los resultados del fraccionamiento cuantitativo de las fracciones orgánicas, mostraron que los porcentajes de carbono asociados a AF y huminas heredadas H<sub>3</sub> fueron predominantes en las capa blanca mientras que en las capas superficial y profunda predominan las fracciones AH + H<sub>1</sub> + H<sub>2</sub> (Tabla No, 21).

Se deduce que la capa blanca tiene humus menos evolucionado, con características similares al tipo *moder*, debido a las características medioambientales desfavorables como la sequía y la menor diversidad biológica, que probablemente impidieron la polimerización del material orgánico. Si se toman en cuenta los parámetros de suelos forestales activos y lo señalado en el suelo de San Gregorio Atlapulco, las características analíticas encontradas en la capa superficial y profunda ubicarían al humus como tipo *mull*, sin embargo su carácter hidromorfo hace más fáctible su semejanza con el tipo *ummoor*.

El humus de la capa superficial fue más estable que la profunda y la blanca, pues su manejo agrícola incluye incorporación de abonos orgánicos y laboreo que promovieron la aireación, oxigenación y actividad biológica acelerada, que junto con el pH caracteriza fisiologías normales en la biota existente; estas condiciones favorecieron que las sustancias precursoras provenientes del material orgánico incorporado al suelo durante su manejo agrícola evolucionaran incrementándose su tamaño molecular y desembocando en la formación de sustancias húmicas complejas como los AH y huminas de insolubilización (H<sub>1</sub> y H<sub>2</sub>).

Los contenidos en carbono de la MOL y de la MOH fueron más altos en la superficie del suelo, intermedios en la capa profunda y menores en la capa blanca.

Los porcentajes de MOL fueron menores que los del MOH, oscilando en las capas profunda y superficial de 6~8 veces menos, mientras que en la capa blanca fueron 3 veces menores (Tabla No. 21).

Los contenidos de cloruros aportados por el agua de los canales en la zona chinampera [ $1.5\text{--}2.5 \text{ cmol (+) L}^{-1}$ ] y de Na [ $0.37 \text{ cmol (+) L}^{-1}$ ] (Reyes, 1992) a su vez debieron modificar la actividad de los ciclos de nitrógeno y carbono, lo que indujo inmovilización .

Los porcentajes de humina heredada ( $H_3$ ) se incrementaron conforme aumentó la profundidad en la calicata (Tabla No. 21), lo que indica menor grado de transformación del humus que se acumuló.

El carbono respecto a la fracción humificada de la  $H_3$  mostró que en la capa blanca su aportación significó alrededor del 20% del carbono de las sustancias húmicas, mientras que en la capa superficial solo fue de 4% y en la capa profunda del 10%. Esta misma tendencia se observó en el porcentaje de carbono respecto al total, pues en la capa blanca esta fracción es importante y en la capa superficial es menor, mientras que en la capa profunda participó con alrededor del 12% del carbono total (Tabla No. 21).

Las concentraciones de carbono de AF más elevados corresponden a la capa superficial, duplican al carbono de la capa profunda; mientras que los contenidos de AF de la capa blanca son más bajos (Tabla No. 21).



Los porcentajes de AF varían alrededor del 30% en capas superficial y blanca, mientras que en la profunda participan con un 25%, por tanto el humus de la capa blanca incluye una alta proporción de las fracciones de AF y  $H_3$  (Tabla No. 21).

Los porcentajes de AH (Tabla No, 21) alcanzan valores más elevados en la capa superficial, intermedios en la capa profunda y menores en la capa blanca. En los porcentajes de carbono humificado y carbono total, se encontró que la capa profunda y superficial fueron de valores muy próximos.

La suma de los contenidos de carbono con respecto al peso y al carbono humificado de AH + AF fue mayor en la capa superficial, representando más del 50%.

El contenido en huminas de insolubilización extraíble  $H_1$ , es más elevado en la capa superficial, que en la capa profunda y blanca. En las huminas de insolubilización no extraíble ( $H_2$ ) los porcentajes fueron mayores en la capa superficial, intermedios en la capa profunda y menores en la capa blanca.

Los índices  $AF/AH > 1$  mostraron que en las capas superficial y blanca es dominante el carbono asociado a los AF, mientras que en la capa profunda el índice  $AH/AF < 1$ , el índice más alto corresponde a la capa blanca, lo que podría suponer un menor grado de evolución del humus de la capa blanca.

Así pues, resumiendo el humus de la capa superficial presenta predominio de constituyentes macromoleculares complejos AH,  $H_1$  y  $H_2$ , pero también hay que tomar en cuenta una considerable proporción de AF. En el humus de la capa blanca en cambio es mayor la proporción de fracciones poco evolucionadas (AF y  $H_3$ ), fracciones jóvenes con grados de aromaticidad.

**El humus de la capa profunda presenta características similares al de la capa superficial. Para el grado de evolución se puede establecer la siguiente secuencia: capa superficial > capa profunda > capa blanca.**

Tabla No.21. Fraccionamiento de materia orgánica de las muestras del suelo de San Luis Tlaxiatlaltemalco.

Muestra	Prof.	%C	%N	C/N	%C MOL	%C MOH	H <sub>3</sub>	AF	AF+ AH	AH	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	AF/AH	H <sub>3</sub> , AF	AH+H <sub>1</sub> +H <sub>2</sub>	
C63	10-20	6.67	0.71	9.39	0.7	5.84	1	0.27	1.89	3.46	1.57	1.1	1.01	1.20		
					10.49	87.55	2	4.05	28.34	51.87	23.54	16.49	15.14			
							3	4.62	32.36		26.88	18.84	17.29		36.98	63.01
C63	80-90	1.59	0.37	4.30	0.41	1.09	1	0.34	0.36	0.57	0.21	0.03	0.15	1.71		
					25.78	68.55	2	21.38	22.64	35.85	13.21	1.89	9.43			
							3	31.19	33.03		19.26	2.75	13.76		64.22	35.97
C63	180-90	3.88	0.60	6.47	0.50	3.34	1	0.41	0.86	1.83	0.97	0.48	0.62	0.89		
					12.88	86.08	2	10.57	22.16	47.16	25.00	12.37	15.98			
							3	12.27	25.75		29.04	10.37	18.56		38.02	61.97

1= % de carbono con respecto al peso 2= Carbono orgánico respecto al carbono total

3= carbono orgánico respecto al carbono de la fracción humificada

MOL = Materia orgánica libre MOH= Materia orgánica humificada H<sub>3</sub> = Humina heredada

H<sub>1</sub> = Humina de insolubilización extraíble H<sub>2</sub> = Humina de insolubilización no extraíble

AF= Acidos fúlvicos AH= Acidos húmicos

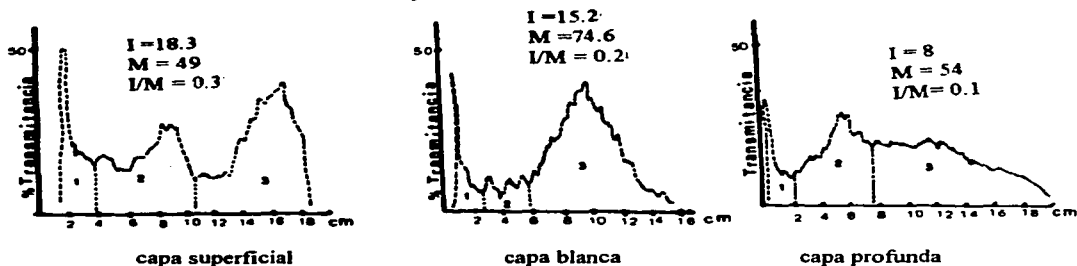
### 7.3.2.2. Caracterización de los ácidos húmicos por electroforesis.

La observación de las curvas densitométricas correspondiente a los electroforegramas de los AH (Gráfica No. 14) del suelo de San Luis Tlaxialtemalco permite comprobar un mayor grado de polimerización de los AH en la capa superficial que en la capa blanca y profunda, como se refleja por los valores I/M.

La fracción húmica de movilidad iónica intermedia (Gráfica No. 14) presentó altos porcentajes tanto en la capa superficial como en la profunda, lo que implicó un menor contenido de grupo funcionales oxigenados con carga negativa.

Los patrones de distribución electroforética se relacionaron a los contenidos de carbono asociados a la fracción de AH de las diferentes capas.

Gráfica No.14. Curvas densitométricas correspondientes a los electroforegramas de los ácidos húmicos extraídos de las capas analizadas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

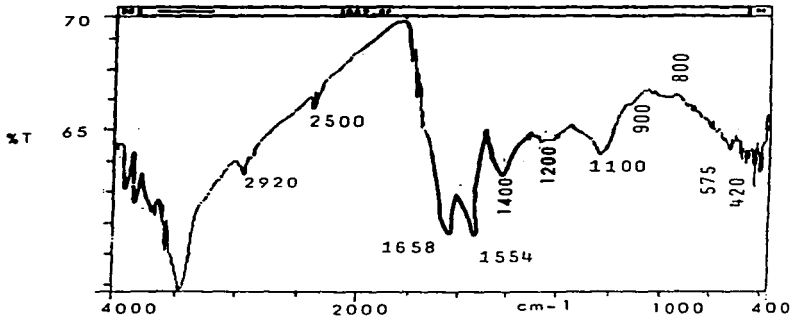
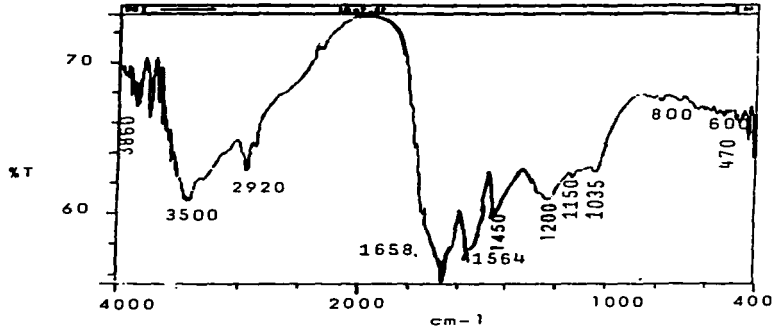
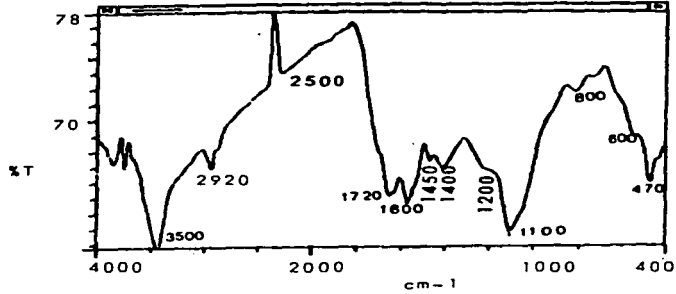


### 7.3.2.3. Espectroscopia de infrarrojo de los ácidos húmicos asociados a la fracción mineral.

Los espectros de IR de los AH asociados a la fracción mineral de las tres capas analizadas (Gráfica No. 15) mostraron bandas a 3860 y 3740  $\text{cm}^{-1}$  características de vibraciones OH asociadas a puentes de hidrógeno, así también se encontraron señales a los 3500  $\text{cm}^{-1}$ , específicas de grupos OH disociados, a los 2920  $\text{cm}^{-1}$  definió la tensión C-H alifática de grupo, la banda de 1720  $\text{cm}^{-1}$  que solo se encontró en los AH de capas superficiales definió grupos carboxilato  $\text{COO}^-$ , la señal 1600-1660  $\text{cm}^{-1}$  hizo evidentes dobles enlaces C=C y/o aminas secundarias de proteínas, así también el área cercana a los 1400-1450  $\text{cm}^{-1}$  caracterizó deformaciones OH, C-O enlazados a grupos OH fenólicos y vibraciones CH,  $\text{CH}_2$  y  $\text{CH}_3$ . La banda encontrada a 1300  $\text{cm}^{-1}$  definió presencia de grupos C-OH fenólicos unidos a arilésteres, entre 1100 y 1200  $\text{cm}^{-1}$  se asoció a ésteres, ácidos aromáticos y grupos C-O unidos a polisacáridos, la de 1035  $\text{cm}^{-1}$ , se presentó unicamente en los AH de capas blancas debida a impurezas de Si-O, las de 800-850  $\text{cm}^{-1}$  definieron C-H aromáticos dentro de anillos, moléculas  $\text{Al}_2\text{OH}$  y sílice la de 750  $\text{cm}^{-1}$  estableció enlaces C-C, C-N, C-O, la de 575 a 600  $\text{cm}^{-1}$  determinó grupos fosfato,  $\text{CH}_2\text{-S-CH}_2$ , Si-O-Si, la de 420-500  $\text{cm}^{-1}$  se atribuyó a largas cadenas  $(\text{CH}_2)_n$  y enlaces Si-O-Al.

Entre los espectros de AH extraídos de las capas superficial, blanca y profunda hubo diferencias en su definición, así por ejemplo la banda 2920  $\text{cm}^{-1}$  fue más intensa en los AH de la capa blanca y las bandas a 1100, 750, 600 y 470  $\text{cm}^{-1}$  en la capa superficial.

Gráfica No. 15. Espectros de infrarrojo de ácidos húmicos asociados a fracción mineral en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.



**7.3.2.4. Concentración en carbono de ácidos fúlvicos  
( aromáticas y alifáticas).**

El porcentaje de AF de carácter predominante fue aromático (Tabla No.23). La capa superficial mostró mayores contenidos de AF aromáticos y alifáticos, siendo 5 y 3 veces mayores que los de la capa blanca y profunda, respectivamente.

El predominio de cadenas alifáticas sobre las estructuras aromáticas en AF es tradicionalmente atribuido al efecto del exceso de humedad producida por los periodos de lluvia y la estrecha interrelación del material edáfico con el agua del lago.

El índice AFt / AFa, mostró que estos últimos oscilaron de 1/6 a 1/3 parte del total de carbono asociado a los AF, los rangos disminuyeron conforme incrementó la profundidad, lo que implicó mayor porcentaje de estructuras aromáticas en los AF cercanos al manto freático y menor en la capa superficial.

**Tabla No. 22. Porcentajes de carbono en forma de ácidos fúlvicos aromáticos y alifáticos en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.**

Muestra	AF aromáticos	AF alifáticos	AF totales	AF totales/ AF aromáticos
C63 10-20 capa superficial	0.31	1.58	1.89	6.09
C63 80-90 capa blanca	0.08	0.28	0.36	4.50
C63180-190 capa profunda	0.27	0.59	0.86	3.18

### **7.3.2.5. Concentración de metales asociada a las fracciones de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos.**

Los metales cuantificados, se retuvieron en mayores porcentajes en AH que en AF (Tabla No. 24). Las diferencias en la concentración de los metales asociados a AH y AF, mostraron que todos fueron más abundantes en la capa superficial, de valores intermedios en la capa profunda y de menores en la capa blanca. En cuanto a los contenidos de fierro y cobalto fueron muy semejantes entre capa blanca y profunda, además de que hubo una cercanía entre los valores de aluminio y zinc, mientras que los de cadmio, níquel y cobre fueron más parecidos en la capa superficial y la profunda. Estos resultados se atribuyeron a la semejanza entre la capa blanca y la profunda en cuanto a contenidos de materia orgánica, número de diátomeas, cantidad de AF alifáticos y definición en las bandas de los espectros de infrarrojo de AH (Tablas No. 17 y 23; Gráficas No. 15). Por otro lado, también se apreció cierta similitud entre los contenidos de carbono de AF aromáticos y fracciones móviles e inmóviles de los AH de capas superficiales y profundas (Gráfica No. 14, Tablas No. 22 y 23).

En la calicata los contenidos de aluminio y fierro fueron predominantes, el zinc, cobre y níquel le siguieron en abundancia, mientras que el cadmio, cromo y cobalto estuvieron poco concentrados, lo que implica la misma tendencia en cuanto a formación de complejos organominerales, puesto que el alto contenido de fierro o aluminio promovió mayor número de enlaces con los AH y AF, debido a que durante la formación de complejos tiene lugar una competencia con los iones existentes y surge una ventaja por la mayor probabilidad de asociación con los iones más abundantes. Al mismo tiempo, se origina una formación de



precipitados, por la presencia de uniones múltiples entre grupos  $\text{COO}^-$  y metales. El fierro ejerce una acción catalítica en la polimerización de las sustancias húmicas de los coloides orgánicos (Stevenson, 1994).

La toxicidad por metales originada por altas concentraciones no se presentó en esta calicata, excepto para el caso del cadmio en los AH de la capa superficial, pues en los demás casos el contenido encontrado no rebasó la cantidad límite de  $1 \text{ mg kg}^{-1}$ .

La estabilidad intermedia propuesta por Stevenson (1994) al formarse complejos entre diversos ligandos y metales divalentes permite deducir que el orden de permanencia de organominerales en esta calicata debió ser cobre, níquel, zinc, cadmio y fierro, por lo que se podría esperar que con base en su abundancia (Tabla No. 24) el fierro, zinc y cobre fueron los que formaron complejos más estables, debiendo permanecer en el suelo en cantidades significativas. Además de esto, el pH casi neutro en todas las capas analizadas influye favorablemente sobre la mayor estabilidad de los complejos organominerales formados (Tabla No. 17).

Los altos contenidos de fósforo (Tabla No. 18) podrían deberse a la contribución de reacciones con fierro, aluminio, cobre y zinc, formando precipitados de los fosfatos correspondientes (Tabla No. 17).

Tabla No. 23. Concentración de metales de las fracciones orgánicas en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

Muestra	Fracción	mg kg <sup>-1</sup>							
		Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
C63 10-20 capa superficial	AH	1725	3	1194	4	2	18	56	28
	AF	924	1	525	2	0	13	29	15
C63 80-90 capa blanca	AH	217	0	203	2	0	7	19	13
	AF	95	0	74	0	0	4	12	7
C63 180-190 capa profunda	AH	524	0	315	3	2	15	25	25
	AF	190	0	98	1	1	8	15	16

### 7.3.3. Polisacáridos totales.

Los contenidos de polisacáridos totales y lábiles fueron mayores en la capa superficial, intermedios en la capa profunda y menores en la capa blanca, lo que se asoció al incremento en relación directa con el contenido de materia orgánica (Tabla No. 24 y No.17).

Las relaciones totales/lábiles mostraron valores que disminuyeron conforme aumentó la profundidad de las capas analizadas, lo que implicó que la mayor parte (74~85%) de los polisacáridos encontrados tuvieron un carácter lábil, el valor más cercano a 1 fue el de la capa profunda (Tabla No. 24).

El carácter lábil de los polisacáridos también se relaciona con los enlaces que forman con los metales, si hay mayor asociación con los metales, la degradación o alteración es menor, por ello en las fracciones orgánicas de la capa superficial, que tiene las concentraciones más altas de aluminio, fierro y zinc con respecto a las capas restantes, se encontró un mayor contenido de polisacáridos totales (Tablas No.23 y 24).

El análisis mediante microsonda (Tabla No.25) sólo detectó presencia de calcio, magnesio y fierro en el liofilizado de los polisacáridos totales, lo que sugiere que estos metales participaron más activamente en la formación de complejos polisacárido-metal y fueron los que impidieron su rápida degradación.

Los porcentajes de magnesio y fierro (Tabla No. 25) fueron mayores en el extracto de la capa superficial y menores en la capa blanca, lo que se asoció de forma inversa con la relación encontrada en el carácter lábil de los polisacáridos (Tabla No.24).

**Tabla No. 24. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.**

Muestra	Tipo de polisacárido	Concentración de polisacáridos g 100g <sup>-1</sup>	Relación Totales/lábiles
C63 10-20 capa superficial	Totales	0.81	1.4
	Lábiles	0.60	
C63 80-90 capa blanca	Totales	0.52	1.3
	Lábiles	0.40	
C63 180-190 capa profunda	Totales	0.61	1.2
	Lábiles	0.52	

**Tabla No. 25. Análisis mediante microsonda del liofilizado de polisacáridos totales del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.**

Muestra	Mg	Ca	Fe
C63 10-20 capa superficial	74.2	25.1	0.7
C63 80-90 capa blanca	70.9	29.1	0.0
C63 180-190 capa profunda	71.2	28.4	0.4

#### 7.3.4. Número de diatomeas en el suelo.

El número de diatomeas (Tabla No. 26) fue mayor en la capa blanca y profunda, lo que se explicó por su origen y ubicación, pues la acumulación de las algas se promovió por los períodos de sequía y por la cercanía con el manto freático.

La presencia en la capa superficial de un número inferior de diatomeas, se debió a que en el agua de riego se incorporan en menor proporción .

Los géneros encontrados de diatomeas encontrados en el suelo de esta chinampa fueron *Navicula sp.*, *Alloucoseira sp.*, *Fragilaria sp.*, *Denticula sp.*, *Epithemia sp.*, *Cymbella sp.*, *Gomphonema sp.*, *Achnanthes sp.* y la especie *Cocconeis placentula* (Werner, 1977) (figuras No. 21~25).

Tabla No. 26 Número de diatomeas en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco

Muestra	Número de diatomeas por gramo de suelo
C63 10-20 capa superficial	725,789
C63 80-90 capa blanca	51,772,972
C63 180-190 capa profunda	43,940,000



21



22

Figura No.21. *Navicula sp.* y *Achnanthes sp.* Figura No.22. *Epithemia sp.* encontradas en la capa blanca del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.



23

24

Figura No.23. *Cymbella sp.* Figura No.24. *Gomphonema sp.* encontradas en la capa blanca del suelo de San Luis Tlaxiátemalco.



Figura No.25. *Cocconeis placentula* encontrada en la capa blanca del suelo de San Luis Tlaxiátemalco.

### **7.3.5. Patrones de distribución del carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.**

El análisis del contenido en carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas, mostró que la capa superficial tuvo los mayores valores, la capa profunda valores intermedios y la blanca los menores (Tabla No. 27 y 28), excepto en las fracciones de limo medio y grueso donde se modificaron los resultados (Tabla No. 28).

Al observar la distribución de carbono y nitrógeno con base en el tamaño de partícula, se encontró que las fracciones de menor tamaño retuvieron los mayores porcentajes (Tabla No. 27); si se toma en cuenta la distribución granulométrica (Tabla No. 28, Gráfica No.16) la relación de los contenidos se alteran en función de los porcentajes altos o bajos de cada fracción, como se observa en la capa superficial en las fracciones de limo fino y arena, en la capa blanca en la de limo grueso y, en la capa profunda, en arena (Tabla No. 17).

El alto porcentaje de limo total y arcilla fueron muy significativos, pues entre estas fracciones y el material orgánico se producen numerosos enlaces que promueven la estabilidad de los agregados lo que induce a considerar, que aunque existan altos porcentajes de materia orgánica, la mayoría de los nutrientes incorporados no se encuentran en formas asimilables disponibles, por lo que la mayor fuente de elementos disponibles en la solución del suelo se encuentra en las fracciones más gruesas.



Los valores de carbono y nitrógeno en relación con base la granulometría y la suma de sus contenidos en cada fracción siempre fueron menores que los cuantificados en la muestra de suelo sin fraccionar (Tabla No. 28), por lo tanto el material restante se consideró MOL, fluctuando de 30 a 50% del carbono total y de 45 a 50% del nitrógeno total (Gráfica No. 16).

La abundancia de carbono y nitrógeno en MOL es importante, pues significa que la inmovilización en partículas gruesas impide el rápido acceso de nutrientes en microorganismos y plantas, requiriendo antes de ello procesos de mineralización.

Las relaciones C/N de las diferentes fracciones calculada porcentualmente en relación con su distribución granulométrica presentan valores altos en la capa superficial, intermedios en la capa profunda, correspondiendo los menores a la capa blanca (Tablas No. 27 y 28).

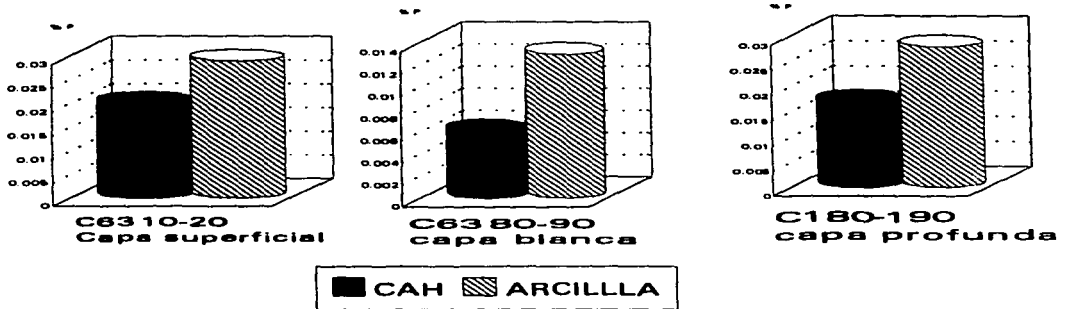
Al considerar la relación de una sola capa en los valores C/N asociadas a las fracciones (Tabla No. 27 y 28), se encontró que en las capas superficial y profunda la fracción de limo medio conservó el valor más elevado, aunque en esta última capa los valores fueron homogéneos, finalmente en la capa blanca el limo fino conservó la relación C/N más alta con respecto a las fracciones restantes.

Sin embargo, las relaciones C/N en todas las fracciones de las capas analizadas mostraron valores normales para suelos agrícolas, lo que se relaciona con buena actividad biológica potencial y ciclos de mineralización equilibrados con los de humificación.

Los contenidos de carbono y nitrógeno, así como las relaciones C/N son bajos en todas las arcillas de la calicata, la capa superficial mostró el menor y, por lo tanto, mayor disponibilidad de nutrientes.

Los contenidos de fósforo (Gráfica No. 17) en las fracciones arcillosas fueron mayores que los encontrados en CAH; hubo mayor porcentaje en las capas superficiales y menor en las capas blancas, lo que se asoció al proceso de fijación de fósforo dentro de las estructuras arcillosas. La dinámica del fósforo, por tanto, fue más significativa en las fracciones libres de materia orgánica.

Gráfica No. 17. Porcentajes de fósforo asimilable en complejos arcilla humus y arcillas del suelo de San Luis Tlaxiátemalco.



Gráfica No. 16. Porcentajes de carbono y nitrógeno de las fracciones granulométricas complejadas con material húmico en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco (C63).

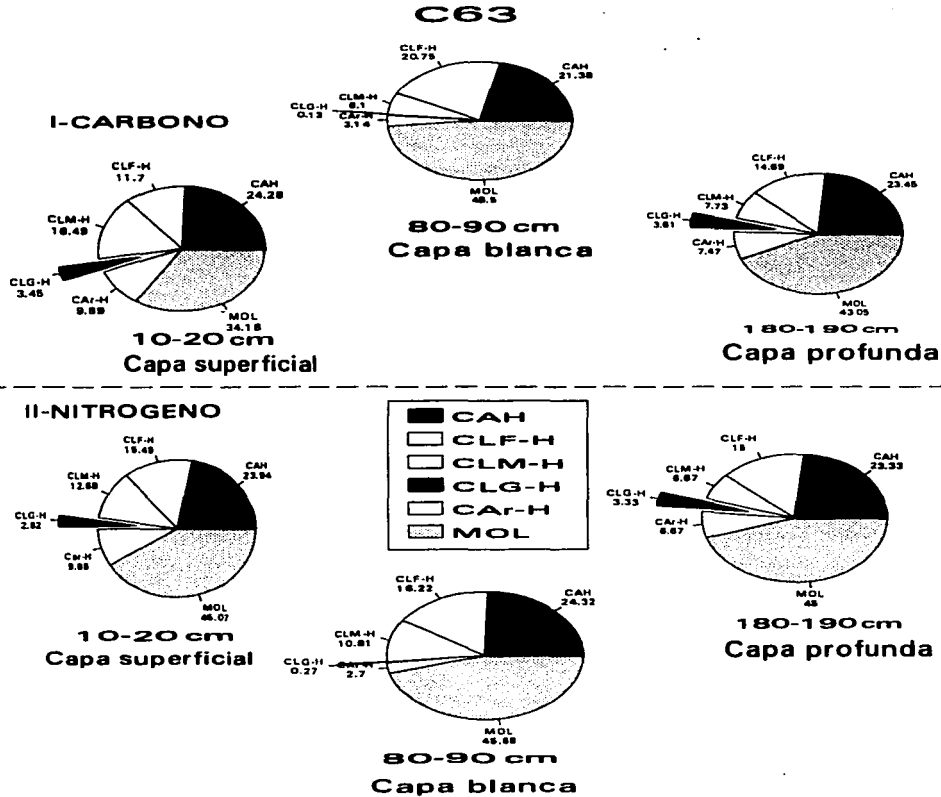


Tabla No. 27. Contenidos de carbono y nitrógeno en  $g100g^{-1}$  de las fracciones granulométricas en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

Muestra		Arcilla	CAH	CLF-H	CLM-H	CLG-H	CAr-H
C63 10-20 capa superficial	%C	0.01	7.41	5.07	4.70	2.67	2.16
	%N	0.02	0.77	0.70	0.38	0.22	0.22
	C/N	0.50	9.62	7.24	12.37	12.14	9.82
C63 80-90 capa blanca	%C	0.01	1.45	1.33	0.56	0.14	0.14
	%N	0.01	0.36	0.26	0.25	0.06	0.03
	C/N	1.00	4.03	5.11	2.24	2.33	4.67
C63 180-190 capa profunda	%C	0.01	3.61	3.25	2.30	1.39	0.83
	%N	0.01	0.54	0.50	0.34	0.24	0.11
	C/N	1.00	6.68	6.50	6.76	5.79	7.54

Misma leyenda que la Tabla No.11.

Tabla No. 28. Contenidos de carbono y nitrógeno con respecto a la distribución granulométrica en el suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

Muestra		CAH	CLF-H	CLM-H	CLG-H	CAr-H	Suelo	$\Sigma$
C63 10-20 capa superficial	%C	1.62	0.78	1.10	0.23	0.66	6.67	4.39
	%N	0.17	0.11	0.09	0.02	0.07	0.71	0.46
	C/N	9.53	7.09	12.22 9.59 LT	11.50	9.42	9.39	9.54
C63 80-90 capa blanca	%C	0.34	0.33	0.10	0.002	0.05	1.59	0.82
	%N	0.09	0.06	0.04	0.001	0.01	0.37	0.20
	C/N	3.78	5.50	2.50 4.30 LT	2.00	5.00	4.30	4.10
C63 180-190 capa profunda	%C	0.91	0.57	0.30	0.14	0.29	3.88	2.21
	%N	0.14	0.09	0.04	0.02	0.04	0.60	0.33
	C/N	6.50	6.33	7.50 6.73 LT	7.00	7.25	6.47	6.70

Misma leyenda que la Tabla No.12.

### **7.3.6. Capacidad de intercambio catiónico total e iones intercambiables en las diferentes fracciones granulométricas.**

La CICT en las diferentes fracciones, es mayor en la capa superficial que en las capas profunda y blanca, correspondiendo la menor CICT a la capa blanca, (Tabla No. 29), los espacios de intercambio son más abundantes en las fracciones más finas y escasos en las más gruesas. Las fracciones inorgánicas más finas (arcilla, limo fino y limo medio) presentaron valores más altos que sus homólogos complejados con el material orgánico, mientras que en las fracciones más gruesas (limo grueso y arena) hubo comportamientos inversos, pues el material asociado al humus dió los mayores valores, indicando que la materia orgánica fue la más activa en estas fracciones (Tabla No. 29).

Los valores de CICT en la fracción arcillosa de las capas superficial y profunda presentaron valores típicos de montmorillonita, no obstante la presencia de illita debió modificar estos valores, mientras que los de la capa blanca fueron más bajos debido a la mezcla de arcillas, donde la caolinita e illita fueron parte importante (Gráfica No.21-23).

Las concentraciones de magnesio fueron mayores que las de calcio como, se aprecia en los valores menores a 1 de las relaciones Ca:Mg (Tabla No. 29). Las fracciones complejadas a material orgánico presentaron índices con valores superiores que los encontrados en el material inorgánico, como corresponde a una participación más activa del magnesio en estas últimas.

En la mayoría de las fracciones, los índices Ca:Mg presentaron los valores más altos en capas superficiales, intermedios en la capa profunda y menores en capa blanca, lo que implicó la misma relación de contenidos de estos nutrientes.

En todas las capas de la calicata, las concentraciones de calcio y magnesio intercambiable fueron mayores en las fracciones asociadas a material húmico que en sus homólogos inorgánicos (Gráficas No. 18~20).

Sin embargo, en las fracciones arcillosas tanto de la capa superficial como de la profunda, el contenido de magnesio, es más alto en arcillas sin materia orgánica, lo que podría deberse a un efecto saturante en la montmorillonita e illita, arcillas identificadas en este suelo (Gráficas No. 18~20).

En todas las fracciones, los PSI, permanecieron por debajo del valor 15, (Tabla No. 29) excepto los que se encontraron en las fracciones de arena, CAr-H y limo grueso de la capa blanca. La concentración de sodio en la mayoría de las fracciones, fue más elevada en la capa superficial, excepto en la fracción CAH que mostró contenidos más altos en la capa profunda, a su vez, se observó que las fracciones complejadas con material orgánico conservaron mayor contenido de sodio que las inorgánicas, excepto en la fracción de arcilla de la capa superficial y las de limo grueso de las capas blanca y profunda, que fueron más altas en material sin materia orgánica (Gráficas No. 18~20).

El sodio disminuyó en forma inversa al tamaño de partícula, tanto en fracciones inorgánicas como complejadas con material orgánico en capas blancas y profundas. Sin embargo su PSI, fue alto en las fracciones más gruesas (limo grueso y arena), debido a su baja CICT. En las capas superficiales, se observaron aumentos de sodio del limo medio al

limo grueso, tanto en los complejos con materia orgánica como en los tratados con  $H_2O_2$ , (Gráficas No 18~20; Tabla No. 29).

Las concentraciones de sodio de esta calicata mostraron el siguiente orden a partir de las fracciones de limo fino a arena: capa superficial > capa blanca > capa profunda (Gráficas No. 18~20).

Sin embargo, en la mayoría de las fracciones analizadas de la capa blanca, los PSI mostraron los valores más elevados; ello se debió a su baja CICT y a su menor concentración de iones (Tabla No 29; Gráficas No 18~20), lo que hizo más evidente la presencia de sodio, pues aunque aparentemente hubo poca concentración de este ión, su participación en el complejo de cambio fue alta sobre todo en la fracción arena (Tabla No 29).

En la mayoría de las fracciones asociadas a material orgánico, se encontraron valores más altos de PSI que en las inorgánicas. La fracción arcilla de la capa superficial, la de limo grueso de la capa blanca y las de limo grueso y arena de la capa profunda, mostraron valores inversos en relación al PSI, pues se encontraron mayores valores en fracciones sin materia orgánica (Tabla No. 29) .

El PSI en la arcilla fue menor al de limo fino, este último fue mayor que el de limo medio, mientras que las fracciones más gruesas (limo grueso y arena) presentaron valores más altos, indicando que estas fracciones retuvieron importantes contenidos de sodio (Tabla No. 29).

La concentración de potasio más elevada se encontró en la capa superficial, observándose valores intermedios en la capa profunda y los más bajos en la capa blanca. En la mayoría de los casos, en todas las capas se observó mayor contenido de potasio en las

fracciones finas y menor en las gruesas, confirmándose la disminución inversamente proporcional al tamaño de partícula. Asimismo, hubo mayores contenidos de potasio en los complejos húmicos asociados al material inorgánico cuando se compararon con sus homólogos inorgánicos (Gráficas No. 18-20).

Las relaciones Ca:K, reflejaron el contenido en calcio muy superior al de potasio, y mostraron los valores más elevados en las fracciones más finas y menores en materiales gruesos. Si bien hubo mayor contenido de potasio en las fracciones más finas también se encontró alta participación del calcio (Tabla No. 29).

Las relaciones K:Na fueron menores a 1, siendo la concentración de sodio mayor que la de potasio desde 10:1 encontradas en las fracciones más finas hasta de 1:1, lo que indica claramente que aunque el problema de la sodicidad aún no se manifiesta, hay tendencia a la acumulación de sales y puesto que su relación con el potasio es muy contrastante, sus efectos serán más agresivos.

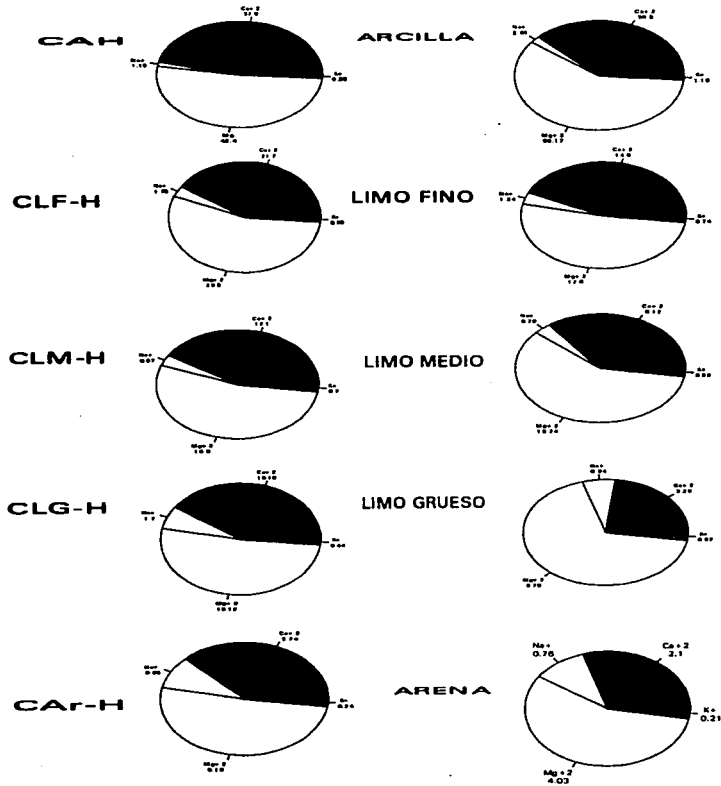
Los porcentajes de saturación de bases (PSB) fueron altos en los CAH de todas las capas analizadas; en las fracciones restantes, hubo descensos en función inversa al tamaño de partícula, así también se encontraron valores más altos en las fracciones complejadas con material orgánico (Tabla No. 29).

El PSB fue más elevado en la mayor parte de las fracciones pertenecientes a la capa superficial cuando se compararon con las capas blanca y profunda. Únicamente la capa blanca, en las fracciones CLF-H, limo fino y limo medio mostró mayor porcentaje. En las fracciones más gruesas de la capa profunda los PSB fueron los más bajos, lo que se explicó por su semejanza con la capa blanca, donde también concurren bajos contenidos de nutrientes o iones intercambiables, aunados al continuo movimiento del agua tanto del riego

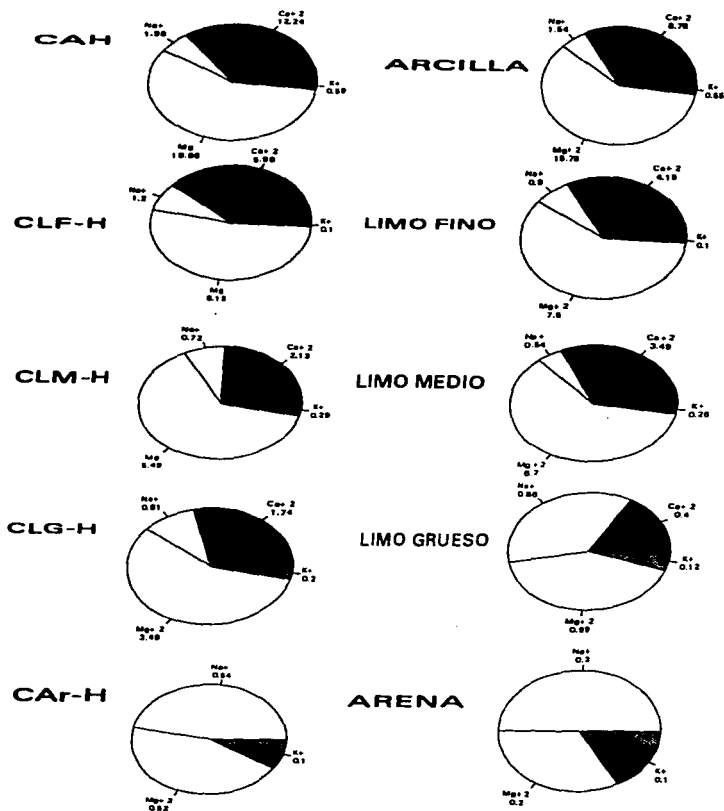


**aplicado como del manto freático, que originaron lixiviación y pérdida de iones sobre todo en materiales con número comparativamente bajo de grupos con capacidad de intercambio.**

Gráfica No. 18. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa superficial (C63: 10-20 cm) en cmol (+) kg<sup>-1</sup> del suelo de San Luis Tlaxiatalmalco.



Gráfica 19. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa blanca (C63: 80-90 cm) en  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$  del suelo de San Luis Tlaxiatalmalco.



Gráfica No. 20. Iones intercambiables en las fracciones granulométricas de la capa profunda (C63: 180-190 cm) en  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$  del suelo de San Luis Tlaxiátemalco.

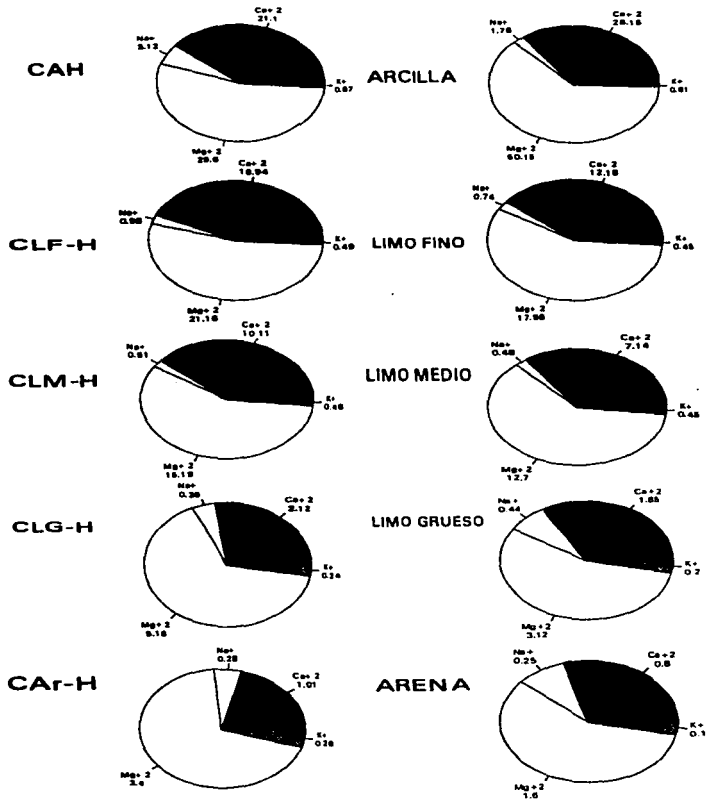


Tabla No 29. Relaciones entre los principales iones intercambiables de las diferentes fracciones granulométricas del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

cmol(+)kg <sup>-1</sup>							
Muestra	Fracción	CICT	Ca:Mg	Ca:K	K:Na	PSB	PSI
C63 10-20 capa superficial	CAH	89.54	0.89	38.28	0.86	92.07	1.28
	Arcilla	112.97	0.63	30.67	0.59	86.63	1.78
	CLF-H	64.54	0.74	28.55	0.43	83.23	2.71
	Limo fino	85.16	0.84	19.73	0.60	40.14	1.46
	CLM-H	47.16	0.76	17.29	0.72	62.91	2.06
	Limo medio	68.12	0.59	13.76	0.75	34.110	1.14
	CLG-H	41.17	0.78	23.16	0.26	61.82	4.13
	Limo grueso	25.15	0.33	8.86	0.39	57.14	3.74
	CAr-H	17.24	0.72	15.58	0.25	58.52	5.51
Arena	13.19	0.52	10.00	0.28	53.83	5.76	
C63 80-90 capa blanca	CAH	39.45	0.62	20.75	0.30	87.88	5.02
	Arcilla	58.73	0.55	15.93	0.36	45.34	2.62
	CLF-H	18.40	0.74	59.80	0.08	83.75	6.52
	Limo fino	29.76	0.55	41.50	0.11	42.51	3.02
	CLM-H	14.79	0.39	7.34	0.40	58.35	4.87
	Limo medio	23.39	0.52	13.42	0.48	46.99	2.31
	CLG-H	10.95	0.50	8.70	0.33	55.16	5.57
	Limo grueso	5.18	0.40	3.33	0.14	45.75	16.60
	CAr-H	2.11			0.18	54.98	25.59
Arena	1.22			0.33	49.18	24.59	
C63 180-190 capa profunda	CAH	59.80	0.71	31.49	0.21	91.12	5.22
	Arcilla	97.90	0.56	46.15	0.35	82.40	1.80
	CLF-H	56.70	0.80	34.57	0.50	69.78	1.73
	Limo fino	74.12	0.68	27.07	0.61	42.30	0.99
	CLM-H	45.24	0.67	21.06	0.94	35.76	2.21
	Limo medio	61.15	0.56	15.87	0.94	33.97	0.78
	CLG-H	31.10	0.41	8.83	0.64	25.34	1.16
	Limo grueso	18.19	0.59	9.25	0.45	30.84	2.42
	CAr-H	11.20	0.30	3.88	0.93	44.20	2.50
Arena	8.12	0.50	8.00	0.40	33.87	3.08	

Misma leyenda que la Tabla No 13.

### **7.3.7. Contenido en metales totales de las fracciones granulométricas.**

La mayor cantidad de metales se concentró en los CAH (Tabla No.30), debido a la abundancia de grupos funcionales de materia orgánica. El fierro y aluminio se encontraron en altas concentraciones con respecto al cobalto, cromo y cadmio. El níquel, zinc y cobre mostraron una abundancia intermedia. Estos resultados siguen los patrones de distribución metálica en los minerales encontrados en el suelo chinampero de San Luis Tlaxialtemalco como los micas, feldespatos y arcillas correspondiente a micas, feldespatos, y arcillas como illita montmorillonita y caolinita (Gráficas No. 21~23).

En las fracciones de las capas superficiales hubo un mayor contenido de todos los metales, que en las capas profundas, que fueron de valores intermedios, en tanto que en la capa blanca mostró los más bajos (Tabla No. 30). Estas concentraciones en los CAH, se relacionaron con el contenido en carbono y nitrógeno (Gráfica No. 18, Tablas No. 27~28), lo que promovió la formación de complejos organominerales en un porcentaje mayor.

El alto contenido de arcillas y metales se asoció a la mejor definición de las bandas en espectros de IR (Gráfica No. 22). Así, la mezcla de los diferentes tipos de arcillas influyó en la variación de concentración de metales.

Si se calculan las diferencias en contenidos de metales entre las fracciones de CAH y arcilla (Tabla No. 30), se observa, que en la mayoría de las capas analizadas, la retención

se asocia a la fracción de arcilla hasta de 50~80%, mientras que el material húmico sólo incluye de 20~50%.

En las capas superficial y blanca la materia orgánica retuvo mayor porcentaje de fierro (53% y 33%), zinc (44% y 33%), en la capa blanca también fue importante el cobre (65%), mientras que en la capa profunda fue más significativa su asociación con cobalto (50%) y fierro (35%).

De acuerdo con los resultados expuestos en la Tabla No.30, en las arcillas de la capa superficial hubo mayor retención de aluminio (68%), níquel (78%) y cobre (65%), en la capa blanca, de aluminio (78%) y níquel (76%) y en la capa profunda de níquel (90%) y zinc (73%).

Así pues la participación de los metales en los patrones de distribución fue mayor en la fracción inorgánica.

Las concentraciones totales de los metales se enmarcan dentro de valores de suelos normales no contaminados (Alloway, 1990).

Tabla No.30. Contenido en metales totales de las fracciones de arcilla y complejo arcilla humus del suelo de San Luis Tlaxiataltemalco.

		mg kg <sup>-1</sup>							
Muestra	Fracción	Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
C63 10-20 capa superficial	CAH	22715	5	10223	1	0	32	52	38
	Arcilla	15344	3	4789	0	0	25	29	24
C63 80-90 capa blanca	CAH	3220	0	951	0	0	17	15	5
	Arcilla	2510	0	640	0	0	13	10	3
C63 180-190 capa profunda	CAH	6785	2	1112	0	0	21	22	10
	Arcilla	4256	1	721	0	0	19	16	7

### **7.3.8. Concentración de polisacáridos en las fracciones de arcilla y complejos arcilla humus.**

Los polisacáridos totales y lábiles en arcillas y CAH se concentraron en mayor proporción en la capa superficial y en una proporción intermedia en la capa profunda correspondiendo la menor concentración a la capa blanca (Tabla No. 31), lo que se asoció con el contenido en materia orgánica de cada capa y al mayor contacto con el agua de riego (Tabla No. 17).

El porcentaje de material lábil fue alto (más del 50%), pues las diferencias con respecto a los contenidos totales oscilaron de 0.05 a 0.18 g 100 g<sup>-1</sup> e igualmente hay una relación de polisacáridos totales/lábiles cercana a 1 (Tabla No. 31).

Si se comparan los CAH de las diferentes capas, el contenido de polisacáridos lábiles respecto al contenido total (Tabla No. 31) es un 69% en la capa superficial, el 63% en la capa profunda y el 59% en la capa blanca. El análisis comparativo entre arcillas mostró un 56% de carácter lábil en la capa superficial, un 51 % en la capa blanca y un 60 % en la capa profunda.

Lo que se explicó en la capa superficial por la mayor actividad microbiana que genera ciclos rápidos de mineralización y degradación de materiales disponibles, en la capa profunda se atribuyó a las características de exceso de humedad que generaron solubilidad y pérdida de material, mientras que en la capa blanca, el alto porcentaje de sílice podría estar relacionado con una mayor estabilidad de la materia orgánica (Tabla No. 32).



Analizando por separado cada capa de la calicata en los CAH se encontraron menores valores del índice totales/lábiles que en las arcillas, lo que implica un carácter más lábil en los polisacáridos cuantificados en CAH y aún menor en arcillas, lo que se explica por la asociación que puede darse entre polisacáridos y arcillas, que promueve una menor degradación.

Los porcentajes de metales detectados por microsonda (Tabla No. 32) en el liofilizado del extracto de polisacáridos totales, mostraron que el contenido de Si fue muy significativo tanto en CAH como en la arcilla de la capa blanca, en la capa superficial el magnesio y calcio fueron dominantes, y en la capa profunda el magnesio y el silicio. Por ello, y con base en el carácter más lábil encontrado en la capa superficial y la menor proporción en la capa blanca, se interpreta que hubo variación de los metales que se enlazaron a los polisacáridos, lo que estableció que el silicio proporcionó un efecto de mayor protección, el magnesio uno intermedio y el calcio el menor. Chenu y Jaunet (1992), señalaron que el fierro y el magnesio ejercen dicho efecto al asociarse minerales ferromagnesianos con polisacáridos.

Tabla No. 31. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en las fracciones complejo arcilla humus y arcilla del suelo de la chinampa de San Luis Tlaxialtemalco.

Muestra	Fración	Tipo de polisacárido	Concentración de polisacáridos $g\ 100\ g^{-1}$	Relación Totales/lábiles
C63 10-20 capa superficial	CAH	Totales	0.50	1.4
		Lábiles	0.35	
	Arcilla	Totales	0.22	1.8
		Lábiles	0.12	
C63 80-90 capa blanca	CAH	Totales	0.32	1.7
		Lábiles	0.19	
	Arcilla	Totales	0.112	1.96
		Lábiles	0.057	
C63 180-190 capa profunda	CAH	Totales	0.496	1.58
		Lábiles	0.313	
	Arcilla	Totales	0.202	1.66
		Lábiles	0.121	

Tabla No.32. Análisis mediante microsonda del liofilizado de polisacáridos totales en las fracciones arcilla y complejo arcilla humus del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.

Muestra	Fración	Mg	Ca	Fe	Al	K	P	Ti	Si
C63 10-20 capa superficial	CAH	54.24	25.13	0.98	15.20		3.15		1.30
	Arcilla	66.24	19.30	2.12	8.13		2.10		2.12
C63 80-90 capa blanca	CAH	22.22	12.23	0.42					65.13
	Arcilla	20.16	7.71						72.13
C63 180-190 capa profunda	CAH	37.15	9.16				1.56		52.13
	Arcilla	45.12	5.12	0.45					49.31

nd = no detectado

### **7.3.9. Análisis de espectros de difracción de rayos X e infrarrojo de arcillas y complejos arcilla humus.**

El análisis realizado únicamente en la capa superficial (Gráfica No. 23), mostró en polvo desorientado una serie de señales entre la región de valores  $d(hkl)$  de 1.45 a 4.06 Å, las 4.06, 3.90 y 3.76 Å correspondieron a feldespatos, la encontrada a 3.22 Å es característica de micas, las de 2.53, 2.15 y 1.78 Å se asociaron a serpentininas tipo bertierina, lizardita o antigorita.

En el agregado orientado de la muestra solo se visualizaron cuatro picos los de 4.06, 3.22, 2.15 y 1.78 Å, cuando se saturó con etilenglicol se hicieron evidentes señales que caracterizan arcilla montmorillonitas o illitas, para la primera se reportan la 4.41, 7.48, 8.56 y 10.88 Å y para la segunda los picos máximos 7.48, 4.41, 4.06 y 3.22 Å; otros picos que aparecieron en esta muestra saturada fueron los de 6.13 y 6.64 Å que corroboraron la presencia de feldespatos.

Los agregados a temperaturas entre 300 y 500 °C, conservaron los picos 3.20, 3.22, 3.76, 4.06 y 4.41 Å lo que denota minerales como micas y feldespatos que resisten el calentamiento, mientras que señales como la de 10.88 y 7.48 Å desaparecieron, debido a que son bandas de las arcillas del grupo de la montmorillonita que son sensibles a elevadas temperaturas.

Al comparar los difractogramas de la muestra con un diagrama de rayos X estándar de montmorillonita, se encuentran varios picos características cercanas, entre las que se

pueden citar la de 2.15, 2.53, 4.41, 6.64, 7.48 y 8.56, así también al comparar los de una illita estandar fueron los de 10.88, 7.48, 4.41, 4.06, 3.76, 3.22, 3.20, 2.53, 2.15 y 1.78 Å.

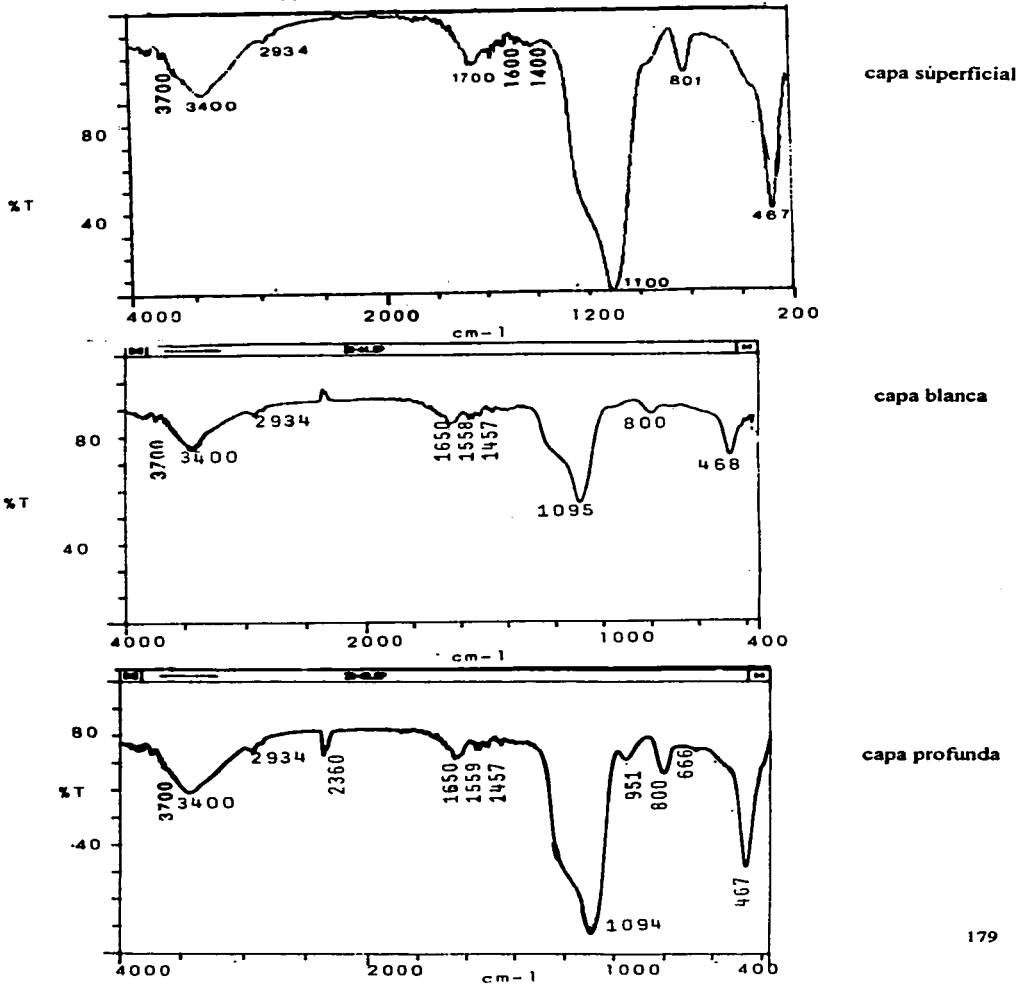
En los espectros de infrarrojo de arcillas (Gráfica No. 22) se encontraron bandas específicas de montmorillonita como la de  $3700\text{ cm}^{-1}$  que establece presencia de grupos OH estructurales internos, esta señal fue poco definida debido al tratamiento a que se sometió el CAH para eliminar el contenido de materia orgánica, también estuvo presente la de los  $3400\text{ cm}^{-1}$ , específica de grupos OH provenientes de moléculas de agua, la de 1620-1650  $\text{cm}^{-1}$  asociada a moléculas de agua disociadas, la de 1095-1100  $\text{cm}^{-1}$  específicas de enlaces Si-O y las de 845, 800, 700, 630 y 465-467  $\text{cm}^{-1}$ , señales relacionadas con filosilicatos cuyos enlaces Si-O-Al son importantes.

Las arcillas y CAH de la capa blanca (Gráficas No.21 y 22), mostraron bandas menos definidas que las de capas superficiales y profundas, debido al menor porcentaje de montmorillonita o illita.

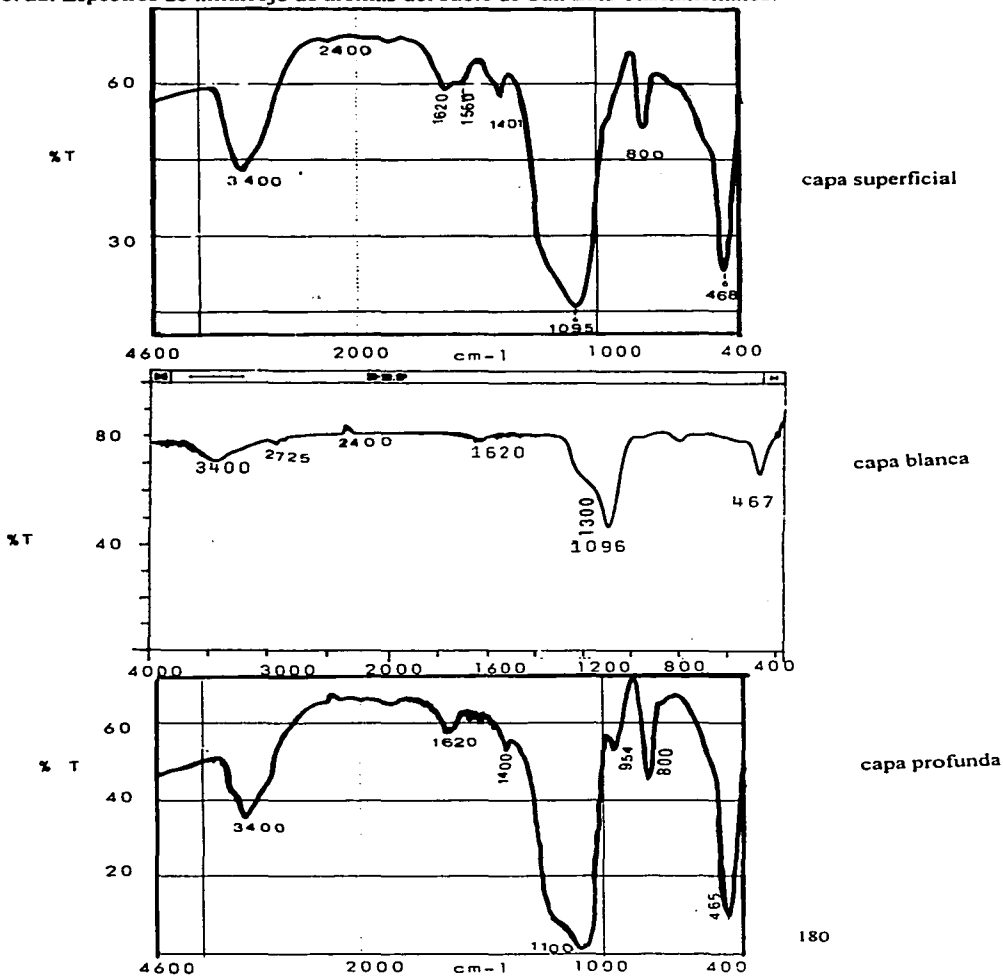
En los espectros de IR de CAH (Gráfica No. 21) se observaron más definidas las bandas  $3700\text{ cm}^{-1}$ , lo que confirmó la alteración provocada por el agente oxidante al eliminar la materia orgánica, la de  $2920\text{ cm}^{-1}$  que no se encontró en arcilla sin materia orgánica se atribuyó a la tensión C-H alifática. Las restantes vibraciones fueron muy semejantes entre CAH y arcillas (Gráficas No. 21 y 22).

Los espectros de IR de todas las muestras, también denotaron presencia de polimorfos de sílice, la 800-801  $\text{cm}^{-1}$ , se asoció a ópalo C, ópalo CT u ópalo A, mientras que las de 1200, 1100, 951-989, 800-801 y 460-470  $\text{cm}^{-1}$ , fueron específicas del ópalo A.

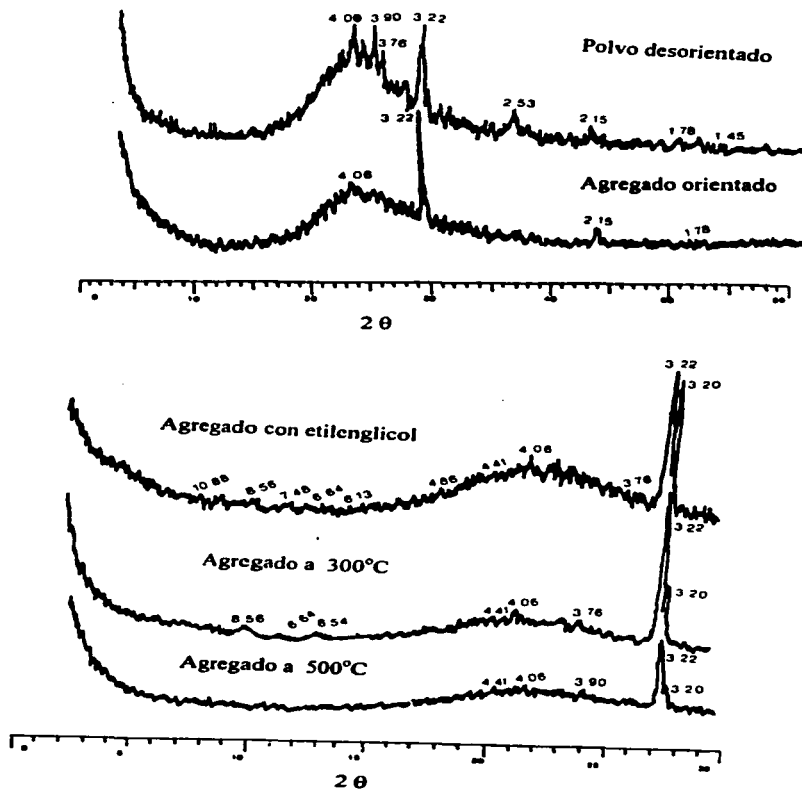
Gráfica No. 21. Espectros de infrarrojo de los complejos arcilla humus del suelo de San Luis Tlaxialtemalco.



Gráfica No. 22. Espectros de infrarrojo de arcillas del suelo de San Luis Tlaxiatemalco.



Gráfica No. 23. Espectros de difracción de rayos X en la arcilla de la capa superficial (0-10 cm) del suelo de San Luis Tlaxiatalmalco.



#### **7.4. Suelo de Tláhuac.**

##### **7.4.1. Características físicas y químicas.**

###### **7.4.1.1. Color.**

Los colores de esta calicata corresponden al color espectral dominante *hue* 7.5 YR, en seco la capa superficial fue gris oscura (7.5 YR 4/0), la capa profunda gris claro (7.5 YR 7/0) y la capa de color blanco (7.5 YR 8/0) en húmedo se conservaron los colores determinados en el análisis de campo. Los colores se asociaron al contenido de materia orgánica, a la presencia de sílice y al drenaje deficiente (Tabla No. 33).

###### **7.4.1.2. Textura.**

La textura migajón limosa en la superficie y franca en las capas blanca y profunda, indican incrementó del contenido de arena, así como una disminución del porcentaje de arcilla, limo fino, limo medio y limo total al aumentar la profundidad (Tabla No.33; Gráfica No.24).

###### **7.4.1.3. Densidad aparente y real.**

La densidad aparente fue más alta en la superficie, disminuyó en la capa blanca y aumentó ligeramente en la capa profunda, los valores más bajos se encontraron en las muestras edáficas con mayor número de biolitos (Tabla No.42), lo que incrementó el contenido de sílice y la microporosidad (Tabla No.33).



La densidad real presenta valores más altos en la superficie y disminuye con la profundidad. La porosidad fue alta en toda la calicata, destacando por sus mayores valores la capa blanca y profunda (Tabla No.33).

#### **7.4.1.4. Reacción del suelo.**

Los valores de pH en agua (relación 1:5) fueron cercanos a 9 en las capas superficial y profunda, mientras que la capa blanca mostró reacciones cercanas a la neutralidad; con respecto a los valores obtenidos en pasta de saturación fueron mayores, encontrándose una diferencia de 0.5 a 0.4 unidades. El pH determinado en una solución de KCl 1 M con valores menores en agua, conservaron el carácter alcalino.

#### **7.4.1.5. Materia orgánica, carbono y nitrógeno.**

Los porcentajes de materia orgánica, carbono y nitrógeno fueron muy semejantes en las capas superficial y profunda, la capa blanca mostró valores menores que significaron cerca de un 50% de los contenidos encontrados en las otras capas (Tablas No. 33 y 34). Los procesos climáticos relacionados con el origen de la capa blanca, pudieron afectar los índices de mineralización, pues cuando los suelos se secan y se vuelven a humedecer se produce un grado de mineralización más rápido que si hubiera una humedad continua. Y puesto que en las capas blancas de Tláhuac y San Luis Tlaxiátemalco se presentaron periodos más prolongados de sequía, al iniciarse un humedecimiento se liberó mayor cantidad de nitrógeno, pues los ciclos de sequía-humedad aumentan la bodegradabilidad de los sustratos recalcitrantes (Alexander, 1980).

En las diferentes capas estudiadas, las relaciones C/N fueron homogéneas, se consideraron similares a las de suelos agrícolas, con un ciclo de mineralización rápido, debido a su manejo agrícola y a los efectos producidos por la alta concentración de iones salinos, pues el tipo y cantidad de sales en un suelo alteran la fijación de nitrógeno y la nitrificación, acelerando o retardando el proceso. El sulfato y cloruro de sodio disminuyen la población de microorganismos amonificantes al elevar la presión osmótica, mientras que el carbonato de sodio hasta concentraciones de 0.4% estimula la amonificación (Echegaray, 1970).

Los contenidos de nitrógeno se relacionan con una mayor actividad microbiana potencial en las capas superficial y profunda, en la capa superficial por asociación con los cultivos sembrados y en la capa profunda por la variabilidad existente durante la formación antrópica de las chinampas, que promovió que parte del nitrógeno permaneciera inmóvil.

#### 7.4.1.6. Fósforo

En toda la calicata el fósforo presenta cantidades similares; en la capa blanca se encontraron menores valores, mientras que a mayor profundidad y en la superficie aumentan los porcentajes (Tabla No. 34).

La disponibilidad de fósforo en este suelo es menor aún cuando sus contenidos varían de 56~236 kg ha<sup>-1</sup>, puesto que los iones ortofosfato secundarios  $\text{HPO}_4^{-2}$  que son los predominantes en reacciones alcalinas se absorben diez veces menos que los iones ortofosfato primarios  $\text{H}_2\text{PO}_4^{-1}$ , abundantes en pHs neutros y ácidos (Tisdale, 1987).

El pH favorece la formación de iones difosfato lo que unido al alto contenido de iones calcio (Tabla No. 34) determina la precipitación de fosfato dicálcico insoluble;

también la presencia de carbonatos y bicarbonatos de calcio o magnesio promueve la precipitación de los iones fosfato; la fijación de fósforo también puede tener lugar por presencia de arcilla, los primeros procesos son diferentes de los que tienen lugar en los suelos ácidos y neutros en los que la fijación de fósforo se asoció a la cantidad y tipo de arcilla, así como a la presencia de iones hierro o aluminio (Tisdale, 1987).

Además el pH alcalino interfiere en la disponibilidad de hierro, calcio y magnesio, pues su solubilidad disminuye (Ortiz, 1987).

#### **7.4.1.7 Iones intercambiables**

Las relaciones Ca:Mg intercambiables, muestran que el contenido de magnesio es superior al de calcio, justificado por el material parental rico en magnesio y por estructuras vegetales con este nutriente. Los contenidos de potasio, calcio y magnesio intercambiables conservaron valores semejantes en las capas superficial y profunda, sus valores fueron mayores a los encontrados en la capa blanca (Tabla No. 34).

El alto contenido de magnesio en los suelos con problemas de salinidad promueve mayor toxicidad que el calcio y sodio, pues al reaccionar con cloruros y sulfatos, incrementa notablemente la presión osmótica (Wild, 1988).

Los índices Ca:K definieron que los contenidos de calcio son muy superiores a los de potasio, la capa blanca conservó los valores más altos y la superficial los menores, lo que implica una mayor diferencia entre estos cationes en la primera. Por tanto, sería recomendable fertilizar para satisfacer los requerimientos de potasio en los cultivos sembrados (Tabla No. 34).

El sodio intercambiable se acumula más en la capa profunda que en la capa superficial, correspondiendo la menor acumulación de sodio a la capa blanca (Tabla No. 34), lo que se explicó por la proximidad de la capa profunda al manto freático y por el arrastre de los iones sodio desde la superficie de la calicata, a través de la lixiviación propiciada por el riego o la precipitación. En la capa superficial la presencia de costras de sales influyó de forma importante, así como los riegos recientes realizados con agua de calidad condicionada por su contenido de sodio y la aplicación de mejoradores orgánicos como el estiércol de vacuno que en grandes cantidades contribuye a la acumulación de iones sodio (Reyes, 1992).

Las bajas relaciones K:Na establecieron que el contenido de sodio predomina sobre el de potasio; en la capa profunda fue más notoria esta diferencia, pues la concentración de sodio superó en más de 50 veces la de potasio.

Los PSI encontrados en toda la calicata se conservaron en valores mayores de 15, las distribuciones de los valores de estos porcentajes y los de CE fueron más altas en la capa profunda, intermedias en la capa superficial y menores en la capa blanca. Los PSI junto con los valores de CE mayores de  $4 \text{ dSm}^{-1}$  caracterizaron al suelo como sódico-salino (Tablas No. 34 ~35).

Dichas características (CE y PSI) promueven la inhibición o disminución del crecimiento y la clorosis de diversos cultivos, entre los que se encuentra el maíz, importante en los ciclos de siembra de esta chinampa (Aceves, 1979).

#### **7.4.1.8 Iones solubles**

Los iones calcio, magnesio y sodio solubles e intercambiables al igual que los contenidos de cloruros, carbonatos, bicarbonatos y sulfatos, presentan concentraciones mayores en la capa profunda, intermedias en la capa superficial y menores en la capa blanca.

La acumulación de altas concentraciones de iones solubles en el suelo, como las que se encontraron en esta chinampa (Tabla No.35) altera la permeabilidad de las membranas celulares vegetales produciendo deficiencias en su nutrición; el sodio disminuye la adsorción de potasio, los sulfatos modifican la absorción de calcio y fósforo, mientras que los cloruros hacen poco asimilables al azufre, fósforo y nitrógeno (Ortíz, 1987).

La RAS conservó la misma relación que los iones solubles, sus valores fueron altos, mayores de 10 en toda la calicata.

La suma de cationes y aniones fue equilibrada en todas las capas analizadas, hubo una ligera ventaja del total de aniones en las capas superficial y profunda, mientras que en la capa blanca el comportamiento fue inverso (Tabla No. 35).

#### **7.4.1.9 Metales totales**

Los contenidos de metales totales (Tabla No. 36) mostraron semejanza en capas superficial y profunda; en la capa blanca los valores son menores. El aluminio y hierro dominaron sobre el zinc, cobre y níquel que conservaron una distribución intermedia y sobre el cromo y cadmio con valores más bajos. A excepción del cadmio los demás valores se consideraron como no tóxicos (Alloway, 1990).

La abundancia de materia orgánica y el mayor contenido de hierro y aluminio debieron promover una formación abundante de organominerales con estos metales. Es importante señalar que la presencia de humedad excesiva en las chinampas junto con altas concentraciones de bicarbonatos (Tabla No.35) pueden provocar clorosis vegetal, pues impiden la disponibilidad de micronutrientes como el cinc y hierro. Y también la presencia de niveles altos de nitrógeno y fósforo hacen poco accesibles al cobre, zinc, hierro y aluminio (Mortvedt et al., 1983).

Tabla No.33. Características físicas y químicas del suelo de Tláhuac.

Muestra	Color en seco	Color en húmedo	DR g cm <sup>3</sup>	DA g cm <sup>3</sup>	Porosi- dad	% Arena	% Limo fino	% Limo medio	% Limo grueso	% Limo total	% Arcilla	pH KCl 1:5	pH H <sub>2</sub> O 1:5	% M.O.
C69 10-20 capa superficial	7.5 YR 4/0 Gris oscuro	7.5 YR 2/0 Negro	1.94	0.59	69.59	18.8	17.4	35.5	1.2	54.1	27.2	8.6	9.3	11.5
C69 86-96 capa blanca	7.5 YR 8/0 Blanco	7.5 YR 6/0 Gris	1.76	0.28	84.04	31.7	12.3	26.2	2.80	41.3	26.9	7.8	6.8	4.6
C69190-200 capa profunda	7.5 YR 7/0 Gris claro	7.5 YR 4/0 Gris oscuro	1.64	0.32	80.49	41.1	9.5	20.9	5.72	36.0	22.9	8.0	10.0	11.3

Misma leyenda que la Tabla No.1.

Gráfica No. 24. Distribución granulométrica de muestras edáficas superficiales, intermedias y profundas del suelo de Tláhuac.

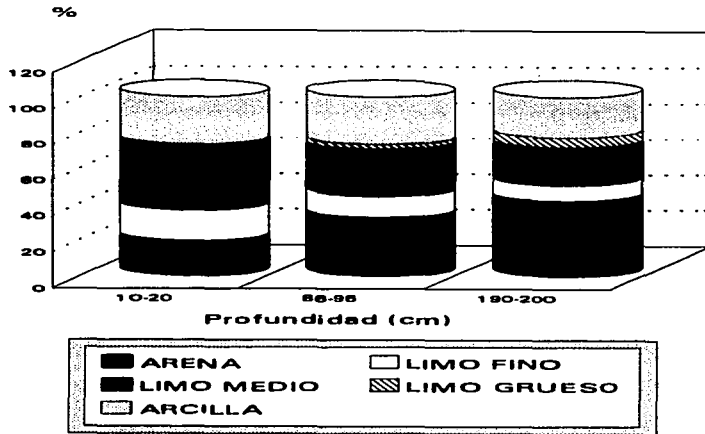


Tabla No. 34. Contenidos de carbono, nitrógeno, fósforo, iones intercambiables, CICT y sus diferentes relaciones den el suelo de Tláhuac.

Muestra	cmol (+) kg <sup>-1</sup>										PSI	PSB		
	% C	% N	C:N	% P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CICT	Ca:Mg			Ca:K	K:Na
C69 10-20 capa superficial	6.66	0.63	10.57	0.02	15.00	19.00	14.95	0.67	49.20	0.79	22.39	0.04	30.39	100.85
C69 86-96 capa blanca	2.68	0.29	9.29	0.01	8.70	10.40	7.19	0.19	28.40	0.84	45.79	0.03	25.32	93.24
C69190-200 capa profunda	6.57	0.64	10.26	0.02	16.00	19.12	23.16	0.45	59.70	0.84	35.55	0.02	38.79	98.37

Misma leyenda que la Tabla No.2.

Tabla No. 35. Características químicas de la pasta de saturación, iones solubles, suma de cationes y aniones en el suelo de Tláhuac.

Muestra	cmol (+) L <sup>-1</sup>											Σ cationes	Σ aniones
	CE dSm <sup>-1</sup>	pH pasta	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	RAS		
C69 10-20 capa superficial	14.50	9.80	19.46	22.70	59.07	0.80	27.15	10.70	25.00	45.87	12.87	102.03	108.72
C69 86-96 capa blanca	4.61	7.20	3.48	5.12	22.51	0.23	8.63	7.95	10.70	10.87	31.34	27.28	
C69190-200 capa profunda	23.20	10.40	27.19	30.60	102.96	0.47	44.60	17.12	40.00	73.40	19.17	161.49	175.12

nd = no detectado

Tabla No. 36. Concentración de metales totales del suelo de San Luis Tlaxiátemalco.  
mg kg<sup>-1</sup>

Muestra	Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
C69 10-20 capa superficial	8319	0	5369	6	3	21	40	18
C69 86-96 capa blanca	84	0	149	3	0	7	18	8
C69190-200 capa profunda	7416	0	4921	5	3	19	34	15

## 7.4.2. Evolución de las fracciones orgánicas.

### 7.4.2.1. Fraccionamiento de la materia orgánica.

El análisis de las fracciones orgánicas (Tabla No. 37) indica que el porcentaje de carbono en forma de AF y humina heredada fue mayor en la capa blanca que en las capas superficial y profunda. La suma de las fracciones evolucionadas (AH y huminas H<sub>1</sub>-H<sub>2</sub>) presenta valores más altos en la superficie y profundidad de la calicata.



Estas características así como la edafogénesis y ecología establecen que el humus en la capa blanca es menos evolucionado. El grado de evolución de la materia en las diferentes capas del suelo alcalino se establece según la siguiente serie gradativa: capa superficial > capa profunda > capa blanca.

El suelo de esta calicata se vió afectado, además por los procesos de inundación y anaerobiosis, por los contenidos de sodio (Tabla No. 34 y 35) que contribuye a la disolución de parte de la materia orgánica. Así también la presencia de humatos y fulvatos de sodio debió ser abundante, ya que sustituye a los iones hidrógeno de grupos carboxilo e hidroxilo fenólicos, lo que se incrementa a medida que el pH se hace alcalino. Bajo reacciones neutras, la sustitución de hidrógenos sólo se da en los grupos carboxilo donde pueden incorporarse diversos metales (Kononova, 1982).

También la presencia abundante de carbonatos y bicarbonatos (Tabla No. 33), debió promover la inmovilización del fierro en forma de  $\text{FeCO}_3$ , pues se ha demostrado que este sólo es móvil a cortas distancias y de forma ascendente (Duchaufour, 1984).

En la calicata los contenidos de carbono asociados a la MOL fueron menores a los de la MOH, (Tabla No. 37), la capa superficial fue la de menores porcentajes de MOL y la de mayores de MOH, contenidos semejantes presenta la capa profunda y la capa blanca muestra el menores contenido de materia orgánica humificada, de ahí que el menor grado de evolución corresponde a la capa blanca.

Los porcentajes de carbono en forma de humina heredada fueron mayores en la capa blanca y menores en la capa superficial (Tabla No. 37); las características químicas de esta fracción indican una humificación directa del humus más acentuada en la capa blanca, puesto que este tipo de huminas se consideran materiales próximos a la materia orgánica

fresca, formados por oxidación parcial de compuestos como ligninas o celulosas de membranas celulares, donde no interviene la fase soluble, sin embargo aparecen grupos carboxilo que incrementan la capacidad de intercambio catiónico y forman enlaces poco estables con las arcillas (Duchaufour, 1984).

En la calicata, los contenidos de carbono asociados a la fracción de los AF de la capa blanca son los menores con respecto al peso total, sin embargo en relación con el carbono humificable y total fue muy semejante a los encontrados en las capas restantes (Tabla No. 37).

El carbono respecto al peso del suelo asociado a los AH fue mayor en las capas superficial y profunda, pero presenta porcentajes muy parecidos a los de la capa blanca con respecto al carbono humificable y total (Tabla No. 37).

La suma de contenidos de carbono de AH y AF con respecto al peso del suelo fueron semejantes en las capas superficial y profunda y mayores que los de la capa blanca; sin embargo, también se dió una tendencia a la semejanza en toda la calicata, en los porcentajes de carbono humificable y total (Tabla No. 37).

En la humina de insolubilización extraíble  $H_1$  los porcentajes de carbono fueron semejantes en las capas superficial y profunda, mientras que la capa blanca mostró los menores valores, las relaciones con el carbono humificable y el total de esta fracción junto con la humina heredada fueron las que diferenciaron marcadamente la constitución del humus de la capa blanca, definiendo su carácter menos evolucionado o estable.

Los porcentajes de carbono de humina  $H_2$  indican una mayor acumulación de esta fracción en la capa superficial, intermedia en la capa profunda y menor en la capa blanca.

**Se encontró que el carbono de la humina con respecto al carbono humificable y total de la capa blanca no están muy alejados del correspondiente a las capas restantes.**

**En la calicata, los índices AF/AH denotan que los contenidos de carbono de ambas fracciones están equilibrados..**

Tabla No. 37. Fraccionamiento de materia orgánica de las muestras del suelo de Tláhuac.

Muestra.	Prof.	%C	%N	C/N	%C MOL	%C MOH		H <sub>3</sub>	AF	AF+ AH	AH	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	AF		H <sub>3</sub> + AF	AH+H <sub>1</sub> +H <sub>2</sub>	
														AF	AH			
C69	10-20	6.66	0.63	10.57	0.25	6.41	1	0.23	1.50	2.90	1.40	0.78	2.50	1.07				
					3.75	96.25	2	3.45	22.52	43.54	21.02	11.71	37.54					
							3	3.59	23.40		21.84	12.17	39.00			26.99	73.01	
C69	86-96	2.68	0.29	9.24	0.34	2.34	1	0.45	0.61	1.20	0.59	0.09	0.60	1.03				
					12.69	87.31	2	16.79	22.76	44.78	22.01	3.36	22.39					
							3	19.23	26.07		25.21	3.85	25.64			45.30	54.70	
C69	190-200	6.57	0.64	10.26	0.46	5.37	1	0.29	1.27	2.58	1.31	0.63	1.87	0.97				
					7.00	81.74	2	4.41	19.33	39.27	19.94	9.59	28.46					
							3	5.40	23.65		24.39	11.73	34.82			29.05	70.94	

1= % de carbono con respecto al peso 2= Carbono orgánico respecto al carbono total

3= carbono orgánico respecto al carbono de la fracción humificada

MOL = Materia orgánica libre MOH= Materia orgánica humificada H<sub>3</sub> = Humina heredada

H<sub>1</sub> = Humina de insolubilización extraíble H<sub>2</sub> = Humina de insolubilización no extraíble

AF= Acidos fúlvicos AH= Acidos húmicos

#### **7.4.2.2. Caracterización de ácidos húmicos por electroforesis.**

La electroforesis de los AH (Gráfica No. 25) del suelo de Tláhuac indica que el tamaño o la carga de la molécula favorecieron una mayor movilidad de las fracciones poco polimerizadas de las capas blancas, pues en los electroforegramas, los porcentajes de área de la fracción móvil fueron más altos que los encontrados en las capas superficial y profunda. La movilidad también se encuentra en relación con un mayor número de grupos funcionales ácidos en la capa blanca según Hayes et al (1989).

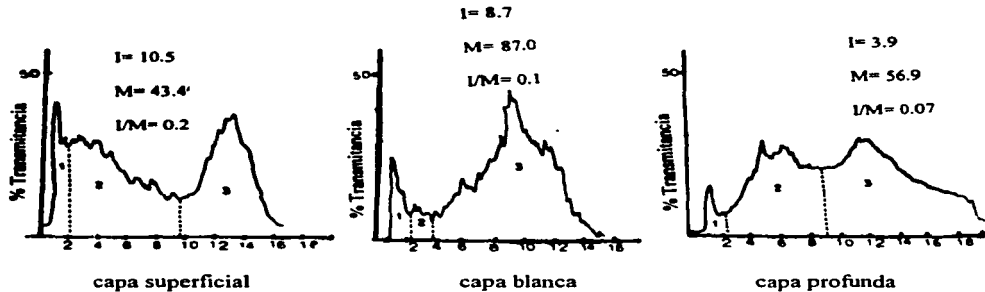
La fracción inmóvil o poco móvil de la capa superficial presentó porcentajes superiores que en las capas blanca y profunda lo que implica mayor polimerización en la estructura de los AH y/o una menor carga negativa dependiente de los grupos funcionales.

Los porcentajes de la fracción intermedia fueron semejantes en los AH extraídos de la superficie y profundidad de la calicata en tanto que la capa blanca conservó los menores valores.

Los valores más altos de las relaciones AH inmóviles/AH móviles (Gráfica No. 25) sugieren que el material húmico de la capa superficial presenta comparativamente el mayor peso molecular y complejidad así como una menor carga negativa relacionada con un menor contenido en grupos funcionales ácidos, en contraposición al menor peso molecular y complejidad de los AH de las capas blanca y profunda que mostraron menores valores I/M.

Estos resultados sugieren un efecto desfavorable de las características edafogenéticas locales, que retardó la evolución en los AH de las capas blanca y profunda.

Gráfica No. 25. Curvas densitométricas correspondientes a los electroforegramas de los ácidos húmicos extraídos de las capas analizadas del suelo de Tláhuac.



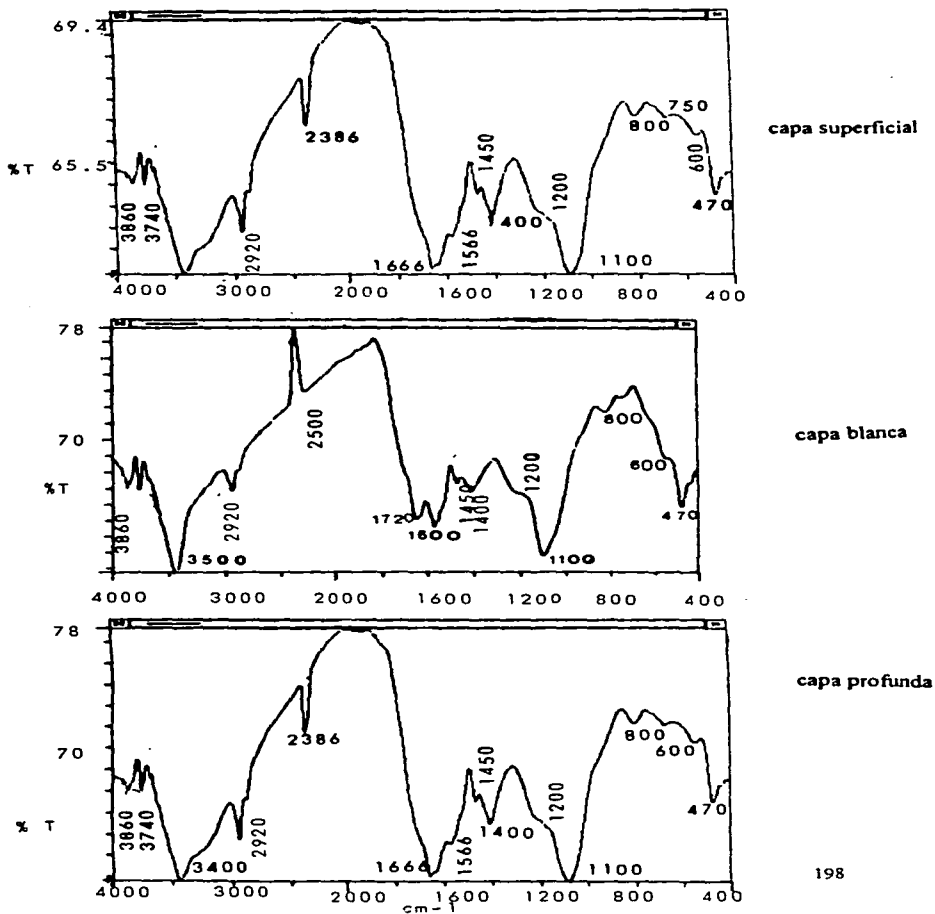
#### 7.4.2.3. Espectroscopía infrarroja de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral.

En los espectros de infrarrojo de los AH asociados a la fracción mineral (Gráficas No. 26) se encontraron bandas como la  $3860$  y  $3740\text{ cm}^{-1}$  que definieron grupos OH de puentes de hidrógeno, la  $3500-3400\text{ cm}^{-1}$  de grupos OH disociados, la  $2920\text{ cm}^{-1}$  de C-H alifáticos, la de  $2386\text{ cm}^{-1}$  detectó  $\text{CO}_2$  del aire grupos OH de  $\text{COOH}$ , la  $1720\text{ cm}^{-1}$  presente en la capa blanca corresponde a grupos carboxilato  $\text{COO}^-$ , la  $1600-1660\text{ cm}^{-1}$  corresponde entre otras cosa a los dobles enlaces  $\text{C}=\text{C}$ , las de  $1400-1450\text{ cm}^{-1}$  específica deformaciones

OH y C-O enlazados a grupos OH fenólicos entre  $1100-1200\text{ cm}^{-1}$  definió presencia de grupos C-O, la banda  $800\text{ cm}^{-1}$  puede correspondera grupos C-H aromáticos y  $\text{SiO}_2$ , la de  $750\text{ cm}^{-1}$  especifican  $(\text{CH}_2)_n$ , entre  $500-600\text{ cm}^{-1}$  determinó grupos fosfato y asociaciones  $\text{CH}_2\text{-S-CH}_2$  y Si-O-Si,  $450-470\text{ cm}^{-1}$  se atribuyó a Si-O-Al.

Las bandas que aparecieron en los espectros de AH de las diferentes capas mostraron semejanza, (Gráfica No. 26), sin embargo las señales  $1600-1720$  específica de grupos carboxilato y dobles enlaces C=C se definió mejor en la capa blanca, lo cual coincidió con el análisis de electroforesis (Gráfica No. 25) que estableció mayor número de grupos ácidos, mientras que el doblete  $1400-1450$  propio de deformaciones OH y C-O unido a grupos OH fenólicos fue más simétrica en las capas superficial y profunda lo que definió el carácter más aromático del material húmico de estas capas.

Gráfica No. 26. Espectros de infrarrojo de ácidos húmicos asociados a la fracción mineral en el suelo de Tláhuac.





#### **7.4.2.4. Concentración en carbono de ácidos fúlvicos (aromáticos y alifáticos).**

Los porcentajes de carbono correspondientes a AF aromáticos fueron menores con respecto a los alifáticos (Tabla No. 38), lo que coincidió con los estudios de Mercado (1993) y García et al., (1994).

La capa superficial mostró mayores contenidos en AF alifáticos y aromáticos, con respecto a la profunda con valores intermedios, y a la capa blanca que presenta valores menores, pero cuyo porcentaje de materia orgánica es aproximadamente el 40% de las capas superficial y profunda.

El predominio de cadenas alifáticas sobre estructuras aromáticas puede estar relacionado con los procesos dinámicos en los que participa el porcentaje de humedad, la actividad antrópica agrícola y la contaminación sódico-salina en la degradación del material húmico.

La relación AF totales/AF aromáticos (Tabla No. 38) mostró que los AF aromáticos de la capa superficial contribuyen con la quinta parte del carbono asociado a la fracción total y en menor proporción al aumentar la profundidad.

**Tabla No. 38. Porcentajes de carbono en forma de ácidos fúlvicos aromáticos y alifáticos en el suelo de Tláhuac.**

Muestra	AF aromáticos	AF alifáticos	AF totales	AF totales/ AF aromáticos
C69 10-20 capa superficial	0.3	1.2	1.5	5.0
C69 86-96 capa blanca	0.1	0.5	0.6	6.0
C69 190-200 capa profunda	0.2	1.0	1.2	6.0

#### **7.4.2.5 Concentración de metales asociada a las fracciones de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos.**

Los metales totales analizados se asociaron en mayor porcentaje en AH que en AF (Tabla No. 39), atribuible a las características químicas diferentes de comportamiento electroforetico (Gráfica No.25) como por las bandas encontradas en los espectros de infrarrojo (Gráfica No.26), lo que promovió una mejor asociación entre los metales y los AH.

Hay mayor número de organominerales con fierro y aluminio, rangos intermedios a base de cinc, cobre y níquel y el menor con cromo y cadmio. Puesto que en la capa superficial se encontraron los contenidos más altos de estos metales, se debió dar una mayor formación de organominerales con respecto a las capas blanca y profunda que fueron semejantes entre sí, y mostraron menores concentraciones.

Las menores solubilidades dadas por la reacción alcalina de este suelo y por la presencia de carbonatos y bicarbonatos (Tabla No.33 y 35) así como la abundancia de los

micronutrientes fierro, cobre, níquel y zinc debieron disminuir su disponibilidad para los cultivos (Tisdale, 1987), por lo que la formación de organominerales, fue de importancia, pues se ha indicado que esta asociación promueve un mejor transporte hacia las raíces que se ve facilitado en este suelo; porque la concentración de aluminio es baja y no promueve competencia con el fierro, sin embargo puede tener lugar por la presencia de calcio. Así también, puesto que el zinc asociado a ligandos orgánicos es estable cuando no hay competencia con fierro y aluminio o con calcio y magnesio, esta dinámica del suelo debió promover bajo contenido de organominerales a base de zinc. Los quelatos de cobre se reporta que son más estables que los de zinc, por lo tanto en el suelo aunque hubo menor concentración del primero sus características de estabilidad debieron generar mayor número de organominerales constituidos de cobre (Norvell, 1983).

De acuerdo con la serie gradativa de estabilidad de complejos formados entre ligandos orgánicos y metales aportada por Stevenson (1994), el fierro, zinc y cobre fueron los que permanecieron en mayor abundancia en la calicata.

De acuerdo con Alloway, (1990), la toxicidad inducida por el contenido de metales no se presentó, excepto para el cadmio.

Tabla No. 39. Concentración de metales en las fracciones orgánicas del suelo de Tláhuac.  
mg kg<sup>-1</sup>

Muestra	Fracción	Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
C69 10-20 capa superficial	AH	419	0	749	4	2	12	12	8
	AF	206	0	437	2	1	5	6	5
C69 86-96 capa blanca	AH	95	0	117	3	1	6	9	2
	AF	28	0	38	2	0	3	3	3
C69 190-200 capa profunda	AH	102	0	194	3	1	5	10	6
	AF	29	0	75	2	0	2	2	4

### **7.4.3. Polisacáridos totales.**

En este suelo los contenidos de polisacáridos totales y lábiles fueron muy homogéneos; con la profundidad disminuye ligeramente el contenido en polisacáridos totales. El valor más elevado de polisacáridos corresponde a la capa blanca.

Las relaciones totales/lábiles (Tabla No.40) demuestran un considerable porcentaje de polisacáridos de carácter lábil (80-90%), la capa superficial mostró mayor estabilidad en estas moléculas atribuida a su mayor contenido de metales aluminio y fierro (Tabla No. 36 y 39), mientras que en las capas blanca y profunda se aprecia menor estabilidad, lo cual se asoció a sus altos porcentajes de humedad y de iones salinos (Tabla No. 33).

El análisis de microsonda (Tabla No. 41) indica presencia de elementos calcio, magnesio, fierro, sodio y silicio, lo cual estableció íntima asociación de estos con los polisacáridos que impidió su rápida degradación.

La presencia de magnesio y calcio disminuyó con el aumento de profundidad, mientras que los contenidos de fierro y sodio fueron más altos en la capa superficial y profunda, el silicio fue alto en todas las muestras (Tabla No. 41); las capas blanca y profunda mostraron los mayores porcentajes atribuibles a su gran población de diatomeas. Estos resultados permiten establecer que es importante la dinámica de asociación entre los polisacáridos y el calcio, magnesio y silicio.

**Tabla No.40. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en el suelo de Tláhuac.**

Muestra	Tipo de polisacárido	Concentración de polisacáridos $g\ 100\ g^{-1}$	Relación Totales/Lábiles
C69 10-20 capa superficial	Totales	0.64	1.3
	Lábiles	0.51	
C69 86-96 capa blanca	Totales	0.58	1.1
	Lábiles	0.52	
C69 190-200 capa profunda	Totales	0.57	1.1
	Lábiles	0.51	

**Tabla No. 41. Análisis mediante microsonda de los polisacáridos totales en el suelo de Tláhuac.**

Muestra	Mg	Ca	Fe	Na	Si
C69 10-20 capa superficial	29.69	12.0	0.3	8.8	49.3
C69 86-96 capa blanca	22.15	11.4	0.1	5.2	61.2
C69 190-200 capa profunda	19.24	10.2	0.2	12.2	58.2

#### 7.4.4. Número de diatomeas en el suelo.

El número de diatomeas (Tabla No. 42) considerablemente mayor en la capa blanca que en la capa superficial. El número de diatomeas de la capa profunda si bien menor se aproxima al número de diatomeas de la capa blanca.

Estos resultados se explican porque la capa superficial es de origen antrópico y en su constitución son predominantes las acumulaciones de estiércoles, la presencia de diatomeas se debió principalmente a su aporte con el agua que se utiliza para el riego y se extrae del

lago. En contraposición, en la capa blanca, los períodos de sequía promovieron la evaporación del agua del lago con formación de franjas de color blanquecino en las cuales se acumuló gran número de algas que se encontraban dispersas.

En la capa profunda por las prácticas agrícolas realizadas a lo largo de la historia de formación de las chinampas, se incorporó material orgánico, que influye sobre el color más oscuro que el de la capa blanca (Tabla No. 33), sin embargo también debió participar en su origen la acumulación de diatomeas durante algún período de sequía, así como la cercanía con el manto freático.

El clima más seco en las zonas de Tláhuac y San Luis Tlaxialtemalco, promovió la formación de horizontes blancos de mayor espesor ( 60~100 cm) que los encontrados en las zona de San Gregorio Atlapulco, de espesores de 2 cm, lo que sugirió que esta zona ha sufrido menor número de períodos de sequía.

En todas las calicatas se encontraron diatomeas de los géneros *Cymbella sp*, *Navicula sp*, *Alloucoseira sp*, *Fragilaria sp*, *Denticula sp*, *Epithemia sp*, *Gomphonema sp* y *Achnanthes sp* y la especie *Cocconeis placentula* ( Werner, 1977) ( Figuras No. 21~25).

Tabla No. 42 Número de diatomeas  
en el suelo de Tláhuac

Muestra	Número. de diatomeas por gramo de suelo
C69 10-20 capa superficial	525,697
C69 86-96 capa blanca	40,010,810
C69 190-200 capa profunda	35,032,432

#### **7.4.5. Patrones de distribución del carbono y nitrógeno en las fracciones granulométricas del suelo de Tláhuac.**

Los contenidos de carbono y nitrógeno en las fracciones de las capas superficial y profunda son muy semejantes y más elevados que en la capa blanca (Tablas No. 43 y 44).

La distribución del carbono y nitrógeno en relación con el tamaño de partícula indica que las fracciones de menor tamaño retuvieron mayores porcentajes de ambos (Tabla No. 43). Si se toma en cuenta la distribución granulométrica (Tabla No. 44), los porcentajes de carbono y nitrógeno fueron más elevados en la fracción arcillosa, sin embargo, la fracción de limo medio y arena alteraron la regla, pues sus porcentajes en peso fueron mayores que las de limo fino y limo grueso (Tabla No.33, Gráfica No. 27).

En el suelo total, los porcentajes de arcilla, así como de limo medio y, en la capa superficial, también el limo fino (Tabla No. 33, Gráfica No. 27) denotan que gran parte del material orgánico se asocia a estas fracciones (Tabla No.44, Gráfica No.27), pues se producen numerosos enlaces dados por las características anfotéricas de estos materiales, lo que establece la presencia de mayor número de organominerales.

La disponibilidad de los nutrientes disminuye conforme los enlaces formados son más fuertes y numerosos, lo que tiene lugar en las fracciones más finas, por tanto en las capas superficial y profunda hubo mayor porcentaje de retención (Tabla No.44 , Gráfica No. 27).

En la calicata, la suma de los porcentajes de carbono y nitrógeno del suelo calculados teniendo en cuenta la distribución granulométrica, son menores que los cuantificados en el suelo sin fraccionar (Tabla No. 44); la diferencia entre estos dos datos se

consideró debido al porcentaje de MOL, que fue muy significativo en todas las capas; en la capa superficial, los porcentajes de carbono asociado a esta fracción muestran valores más bajos que en las capas blanca y profunda, mientras que los contenidos de nitrógeno fueron más altos en la capa blanca y superficial (Gráfica No. 27).

Las relaciones C/N de las diferentes fracciones (Tabla No. 43) presentan los valores más altos en la capa superficial e intermedios en la capa profunda correspondiendo los valores más bajos a la capa blanca. Teniendo en cuenta la distribución granulométrica (Tabla No. 44) en las fracciones CAH y CLG-H se conserva ésta misma relación, mientras que en las fracciones CLF-H y CLM-H disminuyen con la profundidad, finalmente, la fracción CAr-H presenta en la capa profunda los valores más altos, en la capa superficial intermedios, y en la capa blanca los valores más bajos.

Las relaciones C/N encontrados en la mayoría de las fracciones fueron indicativas de un equilibrio entre los procesos de humificación y mineralización a excepción de la relación C/N del limo medio de la capa superficial donde alcanzó valores mayores de 15.

Los contenidos de carbono y nitrógeno en la fracción arcilla a la que se eliminó materia orgánica fueron homogéneos (Tabla No. 43), sin embargo la capa superficial conservó mayor porcentaje de ambos, lo que a su vez también dió lugar a relaciones C/N más altas que las encontradas en las capas blanca y profunda.

Los contenidos de fósforo (Gráfica No.28) en la fracción arcilla fueron mayores que los de CAH, lo que implicó retención importante del fósforo en la fracción mineral del suelo. Analizando por separado ambas fracciones, los valores son semejantes en las muestras de las capas superficial y profunda y mayores que los encontrados en la capa blanca.



Tabla No. 43. Contenidos de carbono y nitrógeno en g 100 g<sup>-1</sup> de las fracciones granulométricas en el suelo de Tláhuac.

Muestra		Arcilla	CAH	CLF-H	CLM-H	CLG-H	CAr-H
C69 10-20 capa superficial	%C	0.13	6.95	6.34	5.01	2.51	1.18
	%N	0.02	0.58	0.49	0.30	0.22	0.14
	C/N	6.50	11.98	12.94	16.70	11.41	8.43
C69 86-96 capa blanca	%C	0.01	2.81	2.72	2.69	0.11	0.05
	%N	0.01	0.33	0.29	0.23	0.04	0.02
	C/N	1.00	8.52	9.38	11.70	2.75	2.50
C69 190-200 capa profunda	%C	0.01	6.86	6.78	5.94	1.37	1.16
	%N	0.02	0.65	0.61	0.58	0.15	0.14
	C/N	0.50	10.55	11.11	10.24	9.13	8.29

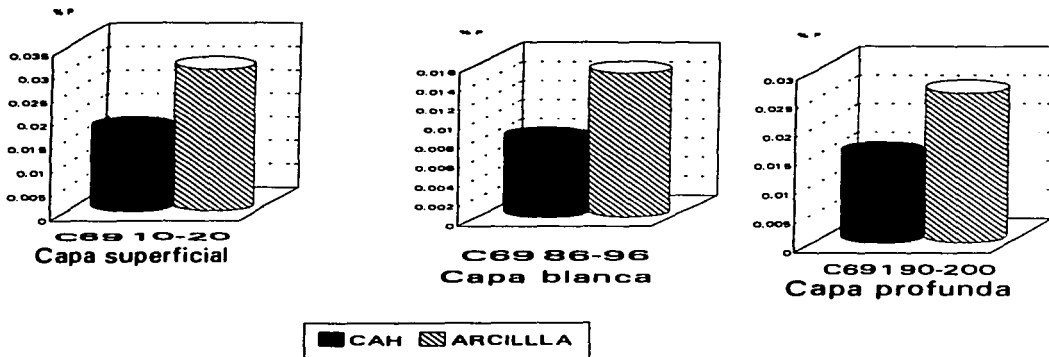
Misma leyenda que la Tabla No 11.

Tabla No. 44. Contenidos de carbono y nitrógeno con respecto a la distribución granulométrica en el suelo de Tláhuac.

Muestra		CAH	CLF-H	CLM-H	CLG-H	CAr-H	Suelo	Σ
C69 10-20 capa superficial	%C	1.88	1.10	1.78	0.03	0.22	6.66	5.01
	%N	0.16	0.08	0.11	0.003	0.03	0.63	0.38
	C/N	11.75	13.75	16.18	10.00	7.33	10.57	13.18
C69 86-96 capa blanca				15.32 LT				
	%C	0.76	0.33	0.71	0.003	0.02	2.68	1.82
	%N	0.09	0.03	0.06	0.001	0.008	0.29	0.19
	C/N	8.44	11.00	11.83	3.00	2.50	9.24	9.58
C69 190-200 capa profunda				11.55 LT				
	%C	1.55	0.64	1.24	0.08	0.05	6.57	4.01
	%N	0.15	0.06	0.12	0.009	0.06	0.64	0.40
	C/N	10.47	10.66	10.33	8.88	8.00	10.26	10.02
				10.32 LT				

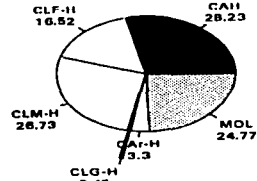
Misma leyenda que Tabla No. 12.

Gráfica No. 28. Porcentajes de fósforo asimilable en complejos arcilla humus y arcillas del suelo de Tláhuac.

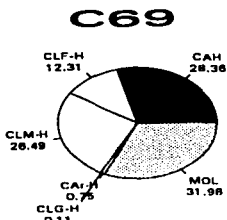


Gráfica No. 27. Distribución del carbono y nitrógeno totales en las distintas fracciones del suelo de Tláhuac.

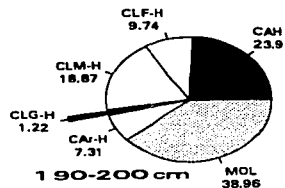
**I. CARBONO**



**1 0-20 cm**  
**Capa superficial**

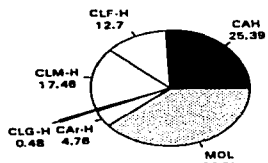


**86-96 cm**  
**Capa blanca**

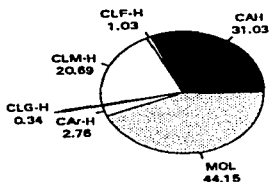


**1 90-200 cm**  
**Capa profunda**

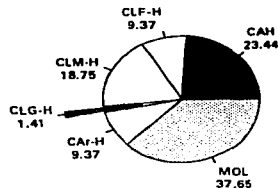
**II. NITRÓGENO**



**10-20 cm**  
**Capa superficial**



**86-96 cm**  
**Capa blanca**



**190-200 cm**  
**Capa profunda**

**7.4.6. Capacidad de intercambio catiónico total e iones  
intercambiables de las diferentes fracciones  
granulométricas.**

Las CICT en todas las fracciones (Tabla No. 45) de la capa blanca fueron menores que en las capas profunda y superficial; también en las fracciones minerales más finas (arcilla, limo fino y limo medio), los valores son más altos que en sus homólogos asociados a material húmico, mientras que en las fracciones más gruesas, la CICT mostró valores más elevados en las fracciones complejadas con materia orgánica, lo que implica que en las fracciones finas los porcentajes de CICT importantes se asocian con puntos de intercambio de la fracción mineral y en las fracciones gruesas la materia orgánica es determinante, ya que proporciona tanto iones como puntos de intercambio.

En casi todas las fracciones analizadas la concentración de calcio fue más alta en la capa superficial que en las capas profunda y blanca, correspondiendo la menor concentración en calcio a la capa blanca (Gráficas No. 29-31).

El calcio disminuyó su concentración al aumentar el tamaño de partícula, tanto en material asociado con materia orgánica como sin ella, excepto en la capa profunda, en la fracción de limo fino. También se observó que las muestras con materia orgánica conservaron mayores contenidos de calcio que las minerales.

El magnesio al contrario del calcio presenta valores más elevados en la capa profunda casi en todas las fracciones, excepto en las fracciones de CLM-H, limo medio y CLG-H; la capa blanca muestra, al igual que en todas las calicatas, la menor concentración de magnesio. Su presencia fue más evidente en fracciones finas y hubo disminuciones de

concentración en las fracciones más gruesas, tanto en material complejado con humus como en las fracciones minerales (Gráficas No.29~31).

La concentración de  $Mg^{+2}$  fue más elevada en complejos húmicos asociados a las diversas fracciones inorgánicas que en material inorgánico. Por tanto las relaciones Ca:Mg de las diferentes fracciones fueron menores de 1, excepto en la fracción arena de la capa superficial (Tabla No. 45); los índices en la mayor parte de las fracciones superficiales fueron más altos que los de máxima profundidad, por tanto, las diferencias más notables entre el magnesio y el calcio se dieron en la capa profunda, lo que en parte se atribuyó al magnesio disuelto en el agua. En el agua de los canales de Xochimilco se han encontrado contenidos de magnesio de  $2.50 \text{ cmol (+) L}^{-1}$  (Reyes, 1992). En varias fracciones, se apreciaron disminuciones de los índices Ca:Mg conforme aumentó el tamaño de partícula, lo que implicó contrastes mayores en los contenidos de estos nutrientes en fracciones más gruesas. Los valores más altos de estos índices también reflejaron contenidos mayores de calcio y magnesio en las fracciones complejadas con material orgánico (Gráficas No. 29~31).

El sodio en este calicata tiene concentraciones más elevadas que en las otras dos. El sodio en las diferentes capas y fracciones presenta mayores concentraciones en la capa profunda, atribuible a la lixiviación por el riego y a la cercanía al agua del lago (Tabla No. 45).

Cabe destacar la mayor concentración de sodio en la fracción arcilla y CAH, tanto en la capa profunda como en la superficial, lo que hace importante señalar que las esmectitas (Gráficas No. 32~34) tienen rangos de adsorción del orden siguiente:  $H^+ > Na^+ > Ca^{+2} > Al^{+3}$ . El hidrógeno y el sodio son los únicos que se han encontrado en medio de las

intercapas cuando se forman complejos arcilla-proteína, lo que se ha explicado por dos razones su fácil desplazamiento y el acceso sencillo a superficies de intercambio expandibles.

Cuando las esmectitas están hidratadas y se saturan con iones polivalentes tienen espacios de solo 1 nm entre láminas de aluminosilicatos, mientras que cuando se expande con Na quedan espacios basales de 1.4 hasta 7 nm, lo que permite la entrada de grandes moléculas dentro de las láminas expandibles, como sucede con las proteínas al ocupar espacios interlaminares de arcillas esmectíticas dentro de capas múltiples o individuales (Newman, 1987).

La capa blanca mantuvo las menores concentraciones de sodio (Gráfica No.29-31). En las capas profunda y superficial se observó tendencia a disminuir su concentración conforme aumentó el tamaño de partícula (Gráficas No.29-31), sin embargo los PSI de las fracciones gruesas como limo grueso y arena, fueron más altos que los de fracciones finas, lo que implicó que el sodio formó parte dominante del complejo de cambio (Tabla No. 45, Gráficas No. 29-31). La capa blanca mostró comportamientos ligeramente distintos a las otras dos capas, pues la fracción arcilla fue la que retuvo menos sodio aumentando su contenido en limo fino, por lo que se observaron disminuciones y nuevamente surgió el aumento en el limo grueso (Gráfica No.30).

La concentración de sodio y el valor de PSI fueron más altos en material inorgánico asociado con humus que en fracciones minerales (Tabla No. 45, Gráficas No. 29-31). Los PSI fueron mayores en las capas profunda y superficial y menores en las blancas en casi todas las fracciones; cabe destacar los altos PSI de la fracción CLG-H, CAR-H y arena en la

capa blanca que fueron mayores a 15, siendo importante anotar el predominio de la fracción arena (Tablas No.33, Gráfica No.24).

En la mayoría de las fracciones de las capas superficial y profunda los PSI fueron mayores a 15, lo que implicó serios problemas ocasionados por el sodio.

La concentración de potasio fue más alta en la capa profunda en todas las fracciones excepto en el CAH. La capa blanca mostró, en las fracciones más finas. (arcilla y CAH) menores cantidades de potasio que las fracciones homólogas de las capas superficial y profunda (Gráficas No. 29~31).

Las fracciones más gruesas que la arcilla, conservaron los menores contenidos de potasio, disminuyeron al aumentar el tamaño de partícula y en casi todos los casos hubo mayores concentraciones de potasio en las muestras con materia orgánica (Gráficas No. 29~31).

Las relaciones Ca:K muestran valores muy superiores de calcio sobre los de potasio; todas las fracciones homólogas, excepto la arcilla y el CAH, presentan más altos valores en la capa superficial y menores en la capa blanca (Tabla No. 45), lo que implica diferencias menores entre los contenidos de potasio y calcio en la capa blanca, pues las concentraciones de calcio se conservaron en niveles bajos. Las relaciones Ca:K fueron mayores en las fracciones más finas, excluyendo a las arcillas de las capas superficial y profunda.; en las fracciones gruesas se encontraron valores menores, lo que implica la presencia de bajos porcentajes de calcio en limos gruesos y arenas (Gráficas No. 29~31).

Las relaciones K:Na son muy bajas, por el alto contenido de sodio; en la capa blanca se encontraron los valores más altos, pues las concentraciones de sodio son menores, mientras que la capa profunda, además de su íntima asociación con el agua contaminada del

lago, recibió y acumuló sales solubles de la superficie. El potasio existente se está perdiendo continuamente durante los ciclos de cultivo y los riegos con agua de los canales promueven acumulaciones importantes de Na.

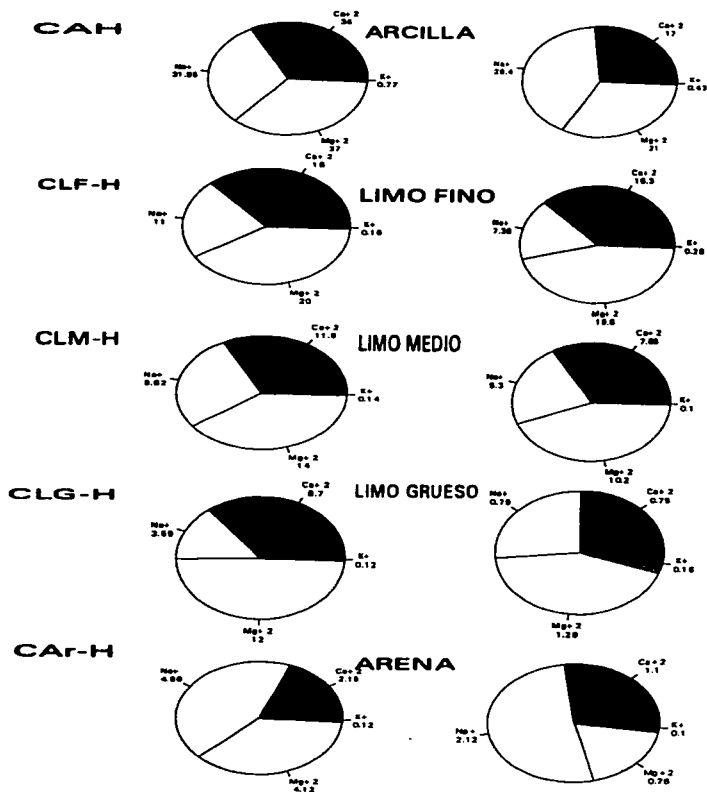
Los altos valores de estos índices indican que en la capa superficial el sodio se asocia en mayor porcentaje a las fracciones finas, mientras que en la capa profunda se asocia al limo; también son indicativas de que las fracciones complejadas con materia orgánica retienen más sodio con respecto a las fracciones minerales (Tabla No. 45).

En las fracciones hasta el CLG-H los PSB más altos se presentan en la capa superficial y los más bajos en la capa blanca; en general, el suelo total muestra valores muy altos indicativo de su gran fertilidad, disminuída por los problemas de contaminación sódico-salina (Tabla No. 45)..

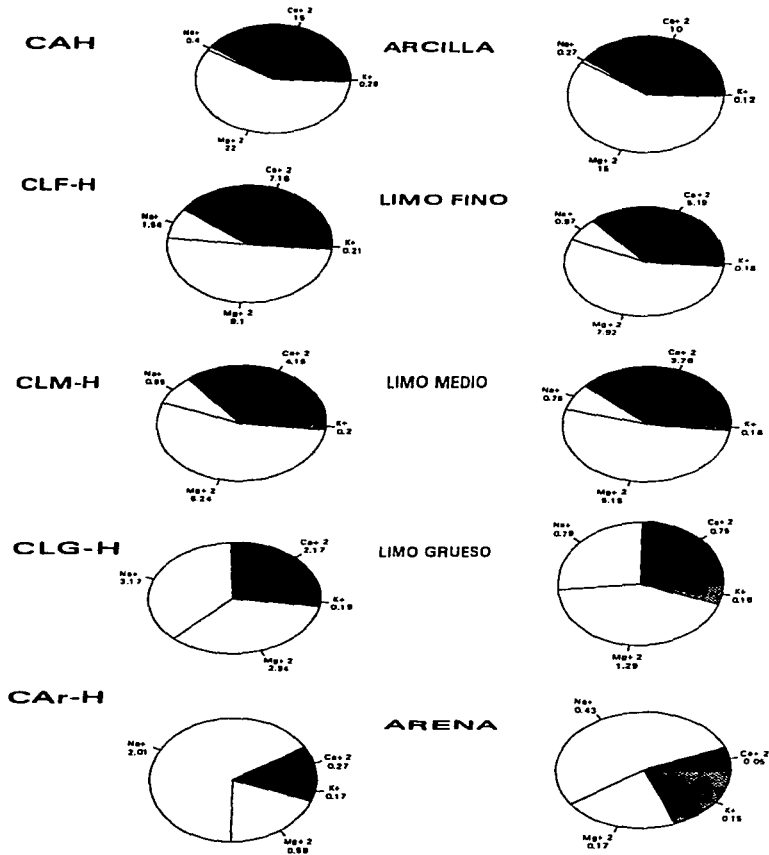
La mayor parte de los resultados muestran que las fracciones más gruesas tuvieron menor PSB que las finas y también que los complejos húmicos asociados a la fracción inorgánica tuvieron mayor PSB que las fracciones inorgánicas (Tabla No. 45).



Gráfica No.29. Iones intercambiables en las diferentes fracciones granulométricas de la capa superficial (C69: 10-20 cm).en cmol (+) kg<sup>-1</sup> del suelo de Tláhuac.



Gráfica No.30. Iones intercambiables en las diferentes fracciones granulométricas de la capa blanca (C69: 86-96 cm ) en  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$  del suelo de Tláhuac.



Gráfica No. 31. Iones intercambiables en las diferentes fracciones granulométricas de la capa profunda (C69: 190-200 cm). en  $\text{cmol (+) kg}^{-1}$  del suelo de Tiáhuac.

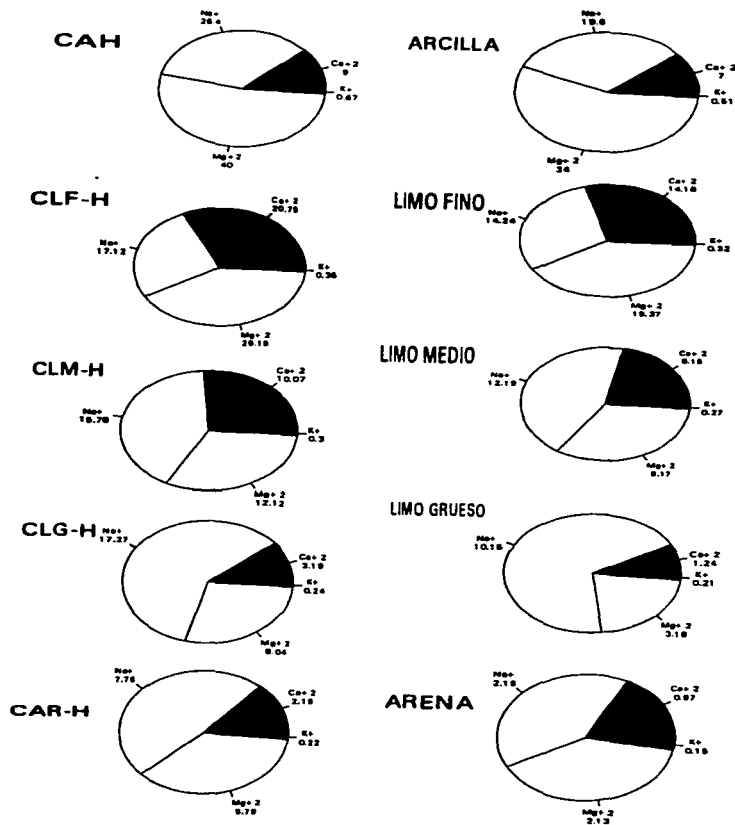


Tabla No. 45. Relaciones entre los principales iones intercambiables de las diferentes fracciones granulométricas del suelo de Tláhuac.

		cmol(+)kg <sup>-1</sup>					
Muestra	Fracción	CICT	Ca:Mg	Ca:K	K:Na	PSB	PSI
C69 10-20 capa superficial	CAH	94.00	0.92	44.16	0.02	109.52	33.99
	Arcilla	102.10	0.81	39.53	0.02	63.52	25.86
	CLF-H	49.20	0.90	112.50	0.01	99.92	22.36
	Limo fino	69.50	0.82	62.69	0.03	62.93	10.62
	CLM-H	38.30	0.83	82.86	0.01	92.85	25.64
	Limo medio	55.60	0.77	78.50	0.02	42.18	9.53
	CLG-H	28.75	0.72	72.50	0.03	84.90	12.49
	Limo grueso	19.42	0.71	12.50	0.05	41.86	16.32
	CAr-H	15.36	0.52	17.92	0.02	73.24	31.64
	Arena	10.27	1.47	11.00	0.05	39.73	20.64
C69 86-96 capa blanca	CAH	41.15	0.68	57.69	0.65	91.52	0.97
	Arcilla	55.20	0.67	83.33	0.44	45.99	0.49
	CLF-H	20.12	0.79	34.09	0.14	89.51	7.65
	Limo fino	31.90	0.65	28.83	0.19	44.70	3.04
	CLM-H	16.74	0.66	20.75	0.21	68.94	5.67
	Limo medio	27.95	0.73	20.89	0.24	35.21	2.68
	CLG-H	12.79	0.74	11.42	0.06	66.22	24.78
	Limo grueso	7.74	0.58	4.68	0.20	38.63	10.21
	CAr-H	3.92	0.46	1.59	0.08	77.55	51.27
	Arena	1.87	0.29	0.33	0.35	42.78	22.99
C69 190-200 capa profunda	CAH	79.04	0.22	13.43	0.02	96.24	33.40
	Arcilla	94.30	0.21	13.72	0.03	64.80	20.78
	CLF-H	65.97	0.79	59.29	0.02	97.57	25.95
	Limo fino	80.15	0.73	44.31	0.02	60.02	17.77
	CLM-H	50.15	0.83	33.57	0.02	76.27	31.42
	Limo medio	70.20	0.67	22.78	0.02	39.57	17.32
	CLG-H	38.74	0.40	13.29	0.01	74.19	44.58
	Limo grueso	24.15	0.39	5.90	0.02	61.20	42.03
	CAr-H	22.76	0.38	9.95	0.03	70.12	34.09
	Arena	9.16	0.45	6.47	0.07	59.39	23.91

Misma leyenda que la Tabla No.13

#### **7.4.7. Contenido en metales totales de las fracciones granulométricas.**

Los contenidos en metales totales fueron más altos en los CAH que en las arcillas. El fierro y aluminio mostraron concentraciones más elevadas que el níquel, zinc, cobre y cromo, como corresponde a la distribución de estos metales en minerales ferromagnesianos y arcillosos, así como en la materia orgánica (Newman, 1987).

En las fracciones de la capa superficial se retuvieron mayores contenidos de metales, en la capa profunda la retención fue moderada y en la capa blanca se observaron los valores más bajos, lo que se relacionó con la actividad biogeoquímica.

El fierro es de los micronutrientes más relacionados con la actividad biológica, por lo que en la capa superficial se encontraron valores más altos que en la capa profunda aunque en ambas los contenidos de materia orgánica fueron semejantes (Gráfica No. 27, Tabla No. 33). Esto puede verse influido por la anaerobiosis generada en la capa profunda, por su saturación con agua del lago, que es poco favorable para el desarrollo de las poblaciones microbianas como lo señala Duchaufour (1984). Así como por la movilidad de las formas ferrosas y férricas entre otras.

Asimismo, estos contenidos de metales se reconocieron en los espectros de IR (Gráficas No. 32 y 33) que mostraron mayores definiciones y simetrías en las bandas asociadas a arcillas y se estableció que la mezcla de arcillas conservó mayores concentraciones de metales en la capa superficial.

Las diferencias entre los contenidos de metales en el CAH y arcilla (Tabla No. 46) indican que en la fracción orgánica el fierro se retuvo de 58% (capa profunda) a 67 % (capa

blanca), mientras que la parte mineral solo conservó de 33% (capa blanca) al 42% (capa profunda). El aluminio y zinc se retuvieron de forma predominante en las fracciones minerales; el primero conservó del 63% (capa profunda) al 72% (capa superficial), mientras que el segundo osciló del 57% (capa blanca y capa profunda) al 65% (capa superficial), El cobre se retuvo en mayor porcentaje en la parte orgánica, varió del 53% (capa profunda) al 60% (capa blanca), finalmente las concentraciones de níquel y cromo fueron variables, pues en las capas superficiales se retuvieron mayores porcentajes en la fracción orgánica y en la capa profunda mayores proporciones asociadas a la fracción mineral.

Tabla No. 46. Contenido en metales de las fracciones arcilla y complejo arcilla humus extraídas del suelo de Tláhuac.

		mg kg <sup>-1</sup>							
Muestra	Fracción	Al	Co	Fe	Cr	Cd	Ni	Zn	Cu
C69 10-20 capa superficial	CAH	17420	0	6370	13	0	29	46	20
	Arcilla	12515	0	2123	4	0	9	30	9
C69 86-96 capa blanca	CAH	4355	0	1145	5	0	10	21	10
	Arcilla	2900	0	381	3	0	2	12	4
C69 190-200 capa profunda	CAH	8571	0	1727	7	0	18	35	15
	Arcilla	5385	0	733	4	0	4	20	7

#### 7.4.8. Concentración de polisacáridos en las fracciones de arcilla y complejo arcilla humus.

En arcillas y CAH la concentración de polisacáridos totales y lábiles fue mayor en la capa superficial, intermedia en la capa profunda, correspondiendo la menor concentración a la capa blanca (Tabla No. 47), lo que se asoció a la mayor actividad biológica de la capa superficial en la que interviene tanto los microorganismos como las raíces de los cultivos lo

que aportaron exudados y desechos fisiológicos, con cierto contenido en polisacáridos (Wild, 1988).

Los contenidos de polisacáridos lábiles fueron altos, representando del 57 al 71% de los totales; si se comparan a su vez las fracciones asociadas a material húmico y las minerales, se observa que las últimas conservaron valores menores, lo cual implicó que los metales que se retuvieron en mayor porcentaje como el aluminio, zinc, níquel y cromo (Tabla No.46) actuaron como protectores contra la degradación que pudiera darse en estas moléculas fáciles de alterar.

Los mayores valores de los índices totales/lábiles mostraron que en la capa superficial hubo menores porcentajes de material lábil, mientras que en la capa blanca se encontraron mayores proporciones. Asimismo, se vio que las arcillas conservaron valores mayores que los de CAH, lo que denotó un carácter más lábil en estos últimos.

Los porcentajes relativos de elementos detectados por microsonda (Tabla No. 48), mostraron que el silicio fue predominante, así también el calcio, magnesio y sodio presentaron valores significativos; en la capa blanca se encontraron los valores más altos de silicio. El sodio, calcio y magnesio mostraron contenidos más altos en las capas superficial y profunda, también los dos últimos conservaron valores más altos en CAH que en arcilla, mientras que el sodio y el silicio presentaron un comportamiento inverso, pues se asociaron en mayor porcentaje en la fracción de arcilla. El hierro presentó contenidos muy semejantes en las diferentes fracciones (Tabla No. 48).

Por tanto, el efecto protector que promovió la reducción de la degradación de los polisacáridos se asoció más que nada al silicio, calcio y magnesio.

Tabla No. 47. Concentración de polisacáridos totales y lábiles en de las fracciones arcilla y complejo arcilla humus del suelo de Tláhuac.

Muestra	Fracción	Tipo de polisacárido	Concentración de polisacáridos g 100 g <sup>-1</sup>	Relación polisacáridos totales/ polisacáridos lábiles
C69 10-20 capa superficial	CAH	Totales	0.81	1.65
		Lábiles	0.49	
	Arcilla	Totales	0.40	1.74
		Lábiles	0.23	
C69 86-96 capa blanca	CAH	Totales	0.32	1.39
		Lábiles	0.23	
	Arcilla	Totales	0.13	1.44
		Lábiles	0.09	
C69 190-200 capa profunda	CAH	Totales	0.62	1.44
		Lábiles	0.43	
	Arcilla	Totales	0.19	1.73
		Lábiles	0.11	

Tabla No. 48. Análisis mediante microsonda del liofilizado de polisacáridos totales en las fracciones arcilla y complejo arcilla humus del suelo de Tláhuac.

Muestra	Fracción	Mg	Ca	Fe	Na	Si
C69 10-20 capa superficial	CAH	21.5	20.8	0.2	18.2	39.3
	Arcilla	17.0	10.2	0.1	21.5	51.2
C69 86-96 capa blanca	CAH	17.2	13.2	0.0	5.9	63.8
	Arcilla	15.7	9.4	0.0	6.8	68.2
C69 190-200 capa profunda	CAH	18.5	15.3	0.1	23.2	43.0
	Arcilla	17.2	12.2	0.1	18.2	52.3



#### **7.4.9. Análisis de espectros de difracción de rayos X e infrarrojo de arcillas y complejos arcilla humus.**

El análisis realizado en la capa superficial (0~10 cm) (Gráfica No. 34), definió en polvo desorientado series de señales entre la región de valores  $d(hkl)$  de 12.40 a 1.78 Å. Los espectros sugieren la presencia de feldespatos a picos 4.06, 3.76, 3.65 y 3.36 Å, illitas y montmorillonitas (12.40, 4.41, 3.02 y 2.95, 2.52, 2.44, 2.15, 1.82 Å), a 12.40 Å esmectitas saturadas con sodio, micas (3.22 Å), serpentinas como bertierina, lizardita o antigorita de (2.52, 2.15 y 1.78 Å), óxidos de fierro como la magnetita o maghemita ( 2.51 Å), así como cuarzo y jarosita (1.82 Å).

En agregado orientado se observaron las mismas señales que en polvo desorientado, además del pico a 7.48 Å, específico de illitas o montmorillonitas, asimismo cuando se saturó con etilenglicol se hicieron evidentes algunos picos específicos de estas arcillas (22.59, 11.60, 7.48 y 3.22 Å), la primera de ésta serie se asocia a esmectitas saturadas con sodio.

Los agregados a altas temperaturas (entre 300 y 500 °C) conservaron los picos 3.20 y 3.22 Å, este último se hizo más simétrico y agudo a 500 °C, lo cual es característico de minerales como las micas, en el pico 4.06 Å también hubo mejor definición a mayores temperaturas, atribuible a la presencia de feldespatos.

La comparación de los difractogramas de las fracciones arcilla con patrones de referencia de montmorillonita, permitieron asignar como picos específicos los observados a 22.59, 12.40, 11.60, 7.41-7.48, 6.13, 4.41, 3.02, 2.52, 2.44, 2.15 Å, mientras que para la

illita coincidieron señales como la 11.60, 7.41-7.48, 3.76, 3.65, 3.36, 4.41, 2.52, 2.44, 2.15, 1.82 Å.

Los espectros de difracción de rayos X de los suelos chinamperos analizados (Gráficas No. 11, 12, 23, 34), mostraron zonas de bandas muy anchas que definen la existencia de amorfos.

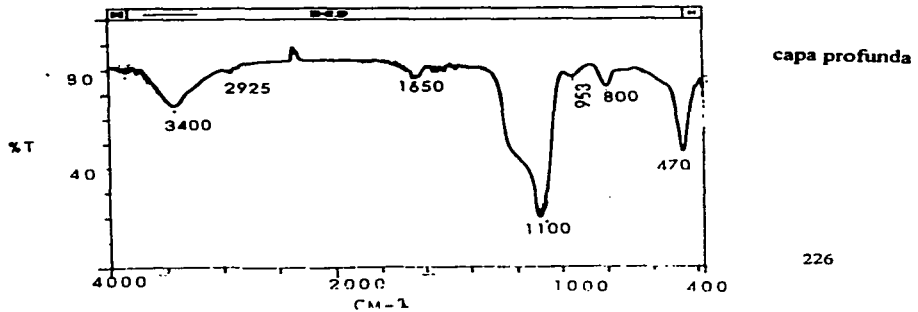
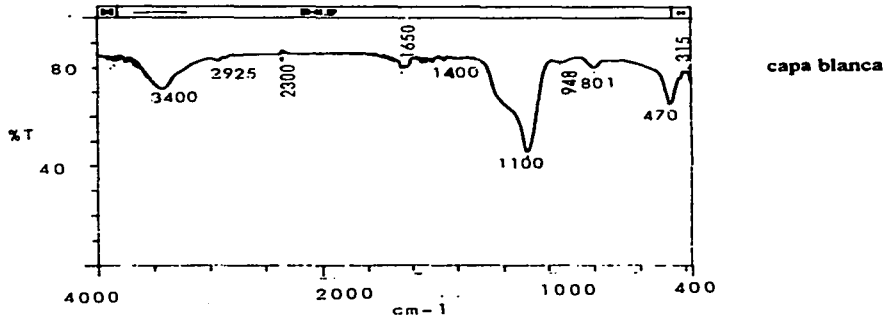
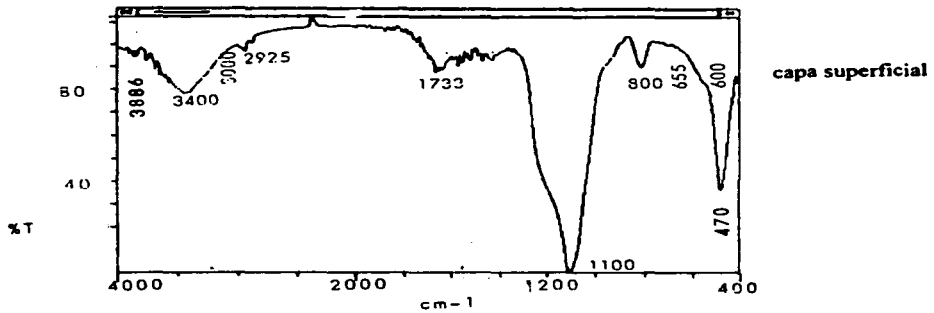
En los espectros de IR de las arcillas (Gráfica No. 33) se encontraron las bandas características de montmorillonita a  $3700\text{ cm}^{-1}$ , sólo presente en la capa superficial, la de  $3400\text{ cm}^{-1}$ , propia de grupos OH provenientes de moléculas de agua, la de 1600-1640 específica de moléculas de agua disociadas HOH, la  $1100\text{ cm}^{-1}$  específica de enlaces Si-O, y la de 800 y 467-470  $\text{cm}^{-1}$ , relacionada a filosilicatos con enlaces Si-O-Al. Al igual que en los espectros de difracción de rayos X, los espectros de IR a partir de la frecuencia de  $1100\text{ cm}^{-1}$  hasta  $479\text{ cm}^{-1}$  establecieron la presencia de polimorfos de sílice desordenados como el ópalo A, de origen biogénico (Dixon, 1989).

Los espectros de IR de los CAH presentaron las mismas bandas (Gráfica No. 32) que las arcillas (Gráfica No. 33), estas últimas en las capas superficiales mostraron bandas que no aparecieron en las demás muestras, (1733, 1522, 1400 y  $1360\text{ cm}^{-1}$ ), las dos últimas se asocian a vibraciones  $\text{NO}_3^-$ .

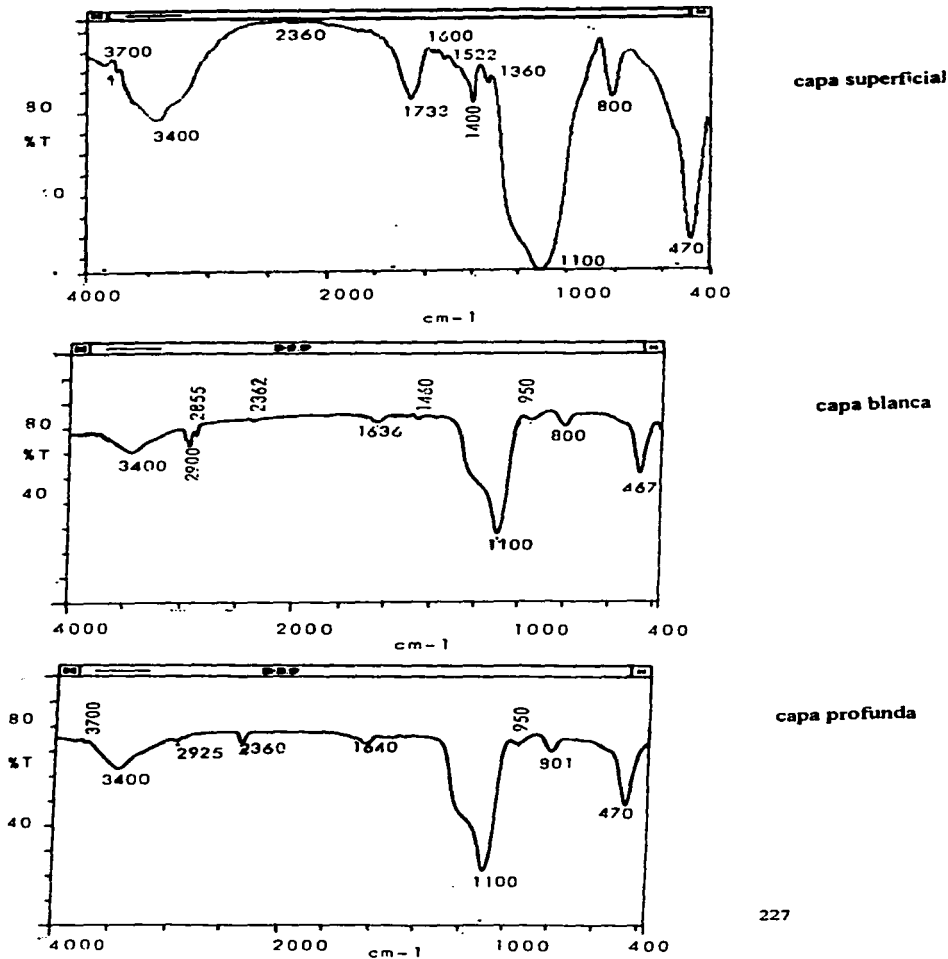
En función de la profundidad de las muestras, las diferencias dadas en los espectros de IR de arcillas (Gráfica No. 33) residieron fundamentalmente en que en la capa superficial hubo mayor definición de las señales  $3400$ ,  $1100$ ,  $800$  y  $470\text{ cm}^{-1}$  y que en las capas blanca y profunda aparecieron las bandas  $2900$ ,  $2360$  y  $950\text{ cm}^{-1}$  (las 2 primeras fueron específicas de enlaces O-H y la última de  $\text{HPO}_4^{2-}$ ).

Las diferencias en los CAH (Gráfica No. 32) extraídos de distintas capas mostraron la misma tendencia que las arcillas, pues estuvieron más definidas las bandas a  $3400$ ,  $1100$ ,  $800$  y  $470 \text{ cm}^{-1}$  en la capa superficial, si bien los hombros a  $2925 \text{ cm}^{-1}$  y a  $948-953 \text{ cm}^{-1}$  sólo aparecieron en las capas blanca y profunda como correspondería a la presencia de enlaces O-H y  $\text{HPO}_4^{-2}$  ó polimorfos de sílice.

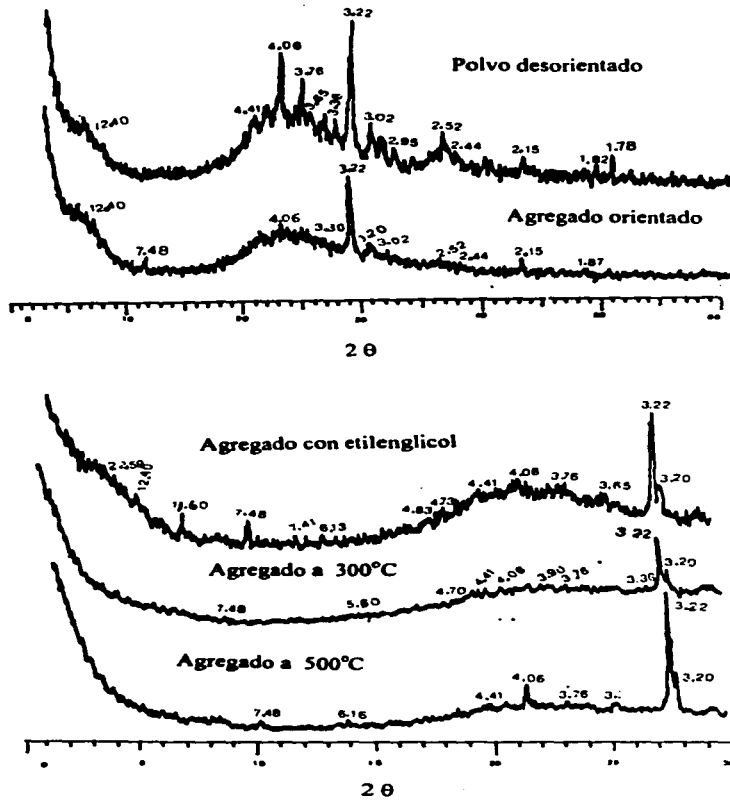
Gráfica No.32. Espectros de infrarrojo de complejos arcilla humus del suelo de Tláhuac.



Gráfica No.33. Espectros de infrarrojo de arcillas del suelo de Tláhuac.



Gráfica No.34. Espectros de difracción de rayos X en la arcilla de la capa superficial (0-10 cm) del suelo de Tláhuac.



## **7.5. Bioensayo.**

### **7.5.1. Número de semillas que germinaron.**

Sólo hubo diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos No. 1, 5, 19, 22 y 24, con promedio de 4 semillas germinadas y el tratamiento No. 9 con 1.5 (Tabla No. 49). No se encontraron efectos diferenciales entre tratamientos por dosis, pH, contenidos de materia orgánica distintos, y profundidad de la capa donde se extrajo el sustrato probado, lo que se atribuyó a que al inició de la germinación la semilla posee reservas de nutrientes (Hartmann, 1989), lo cual se corroboró porque el testigo mostró valores de germinación estadísticamente iguales a los tratamientos restantes.

Con base en el programa de SAS y la prueba de Tukey, se encontró una interacción entre el pH y la presencia de humus, encontrándose diferencias significativas y mayor germinación cuando el sustrato correspondió a arcillas ácidas con presencia de humus, mientras que en las alcalinas fue opuesto el efecto, ya que hubo mayor germinación en ausencia de humus (Tabla No. 49).

### **7.5.2. Longitud del tallo.**

Al analizar los tratatamientos independientemente de los factores que participaron, mostraron que las diferencias estadísticas significativas entre las distintas dosis no se reflejaron en la mayor parte de los tratamientos (Tabla No. 50); ya que la respuesta fue variable, en ocasiones, la mejor se encontró en la dosis con 30 mg kg<sup>-1</sup>, (T<sub>7</sub> vs T<sub>10</sub> y T<sub>20</sub> vs T<sub>23</sub>) mientras que en los tratamientos T<sub>13</sub> vs T<sub>16</sub> y T<sub>21</sub> vs T<sub>24</sub> la respuesta fue opuesta, pues

hubo mayor crecimiento del tallo en las plantas que se cultivaron en sustratos con dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup> (Figura No. 26).

El efecto de la materia orgánica tampoco se apreció de manera definitiva en el desarrollo del tallo, pues no se encontraron diferencias significativas entre la mayor parte de los tratamientos con materia orgánica (CAH) o sin ella (arcillas). Hubo tres pares de sustratos homólogos en dosis y pH que sí fueron significativamente diferentes el T<sub>4</sub> vs T<sub>16</sub>, T<sub>10</sub> vs T<sub>22</sub>, T<sub>12</sub> vs T<sub>24</sub>, donde se encontró que los medios de cultivo a base de arcilla dieron mayores longitudes (Tabla No. 50, Figura No. 26).

Hubo efectos evidentes del pH sobre el crecimiento del tallo, que pudo apreciarse al comparar tratamientos con diferente reacción como el T<sub>3</sub> vs T<sub>9</sub>, T<sub>4</sub> vs T<sub>10</sub>, T<sub>5</sub> vs T<sub>11</sub>, T<sub>6</sub> vs T<sub>12</sub>, T<sub>15</sub> vs T<sub>21</sub>, T<sub>16</sub> vs T<sub>22</sub>, T<sub>17</sub> vs T<sub>23</sub> y encontrar diferencias significativas de la longitud del tallo en las plantas desarrolladas en sustratos con fracciones extraídas del suelo ácido (Tabla No 50, Figura No. 26).

La mayor longitud del tallo se obtuvo en el tratamiento No. 16 (80 mg kg<sup>-1</sup> de arcilla de la capa superficial ácida), que dió diferencias significativas con respecto al testigo, a los tratamientos a base de CAH (T<sub>9</sub> ~ T<sub>12</sub>) y a las arcillas alcalinas (T<sub>21</sub> y T<sub>23</sub>) que fueron los produjeron menores longitudes, diferenciándose de los tratamientos restantes. Las plántulas desarrolladas en el tratamiento No. 16 (T<sub>16</sub>) duplicaron la longitud encontrada en los otros tratamientos considerados como mejores y, en relación a los poco favorables, triplicaron su tamaño; con respecto al testigo fue muy contrastante la diferencia, pues fue 7 veces mayor (Tabla No. 50, Figura No. 26).



Al realizar el análisis de los factores que intervinieron en los resultados se encontró un efecto significativo favorable para los sustratos ácidos, así también la ausencia de humus en los tratamientos incrementó la longitud del tallo de las plantas *A. majus*. La profundidad de la que se extrajeron los sustratos también influyó, se encontró mayor crecimiento del tallo en plantas cultivadas con arcillas o CAH de capas superficiales y menores en las de capas blancas y profundas. Todas estas diferencias fueron estadísticamente significativas. Las distintas dosis no mostraron efectos diferenciales (Tabla No. 50).

Hubo tres tipos de interacciones de primer orden con diferencias significativas, la de dosis~profundidad, pH~dosis y la presencia de humus~profundidad. La dosis~profundidad, mostró que el mayor desarrollo del tallo se debió a la dosis de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$  y los tratamientos de capas superficiales. La de pH~dosis mostró que el efecto fue primordialmente de pH, ya que se encontraron diferencias significativas entre tratamientos de pHs ácidos y alcalinos, desarrollándose mejor la planta *A. majus*, bajo condiciones ácidas. La de humus~profundidad, mostró claramente que la ausencia de materia orgánica fue más de mayor peso sobre el efecto de crecimiento del tallo, pues las distintas profundidades no mostraron diferencias significativas, a excepción de la capa superficial, sin humus, con las restantes medias de comparación (Tabla No. 50).

También hubo una interacción de segundo orden entre pH~dosis~profundidad..

### 7.5.3. Longitud de la Raíz.

Las dosis de algunos pares de tratamientos homólogos determinaron diferencias estadísticas significativas; en sustratos con CAH sólo se presentó esta respuesta entre el T<sub>2</sub> vs T<sub>5</sub>, mientras que en medios a base de arcillas hubo contrastes al comparar T<sub>13</sub> vs T<sub>16</sub>, T<sub>14</sub> vs T<sub>17</sub>, T<sub>15</sub> vs T<sub>18</sub>, T<sub>21</sub> vs T<sub>24</sub>; la mayor parte de estos resultados mostraron que la concentración de 80 mg kg<sup>-1</sup> fue favorable con respecto a la de 30 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla No.51, Figura No.26).

La presencia de materia orgánica en algunos casos promovió el mayor desarrollo radicular, como se apreció en las diferencias significativas que favorecieron los resultados encontrados en CAH al compararse con arcillas (T<sub>1</sub> vs T<sub>13</sub>, T<sub>5</sub> vs T<sub>17</sub>), sin embargo, en varias ocasiones la ausencia de material orgánico en sustratos a base de arcilla permitió el mejor crecimiento de las raíces de las plantas cultivadas en este medio (T<sub>2</sub> vs T<sub>14</sub>, T<sub>6</sub> vs T<sub>18</sub>, T<sub>9</sub> vs T<sub>21</sub>, T<sub>12</sub> vs T<sub>24</sub>) (Tabla No.51 Figura No. 26).

El pH ácido de los sustratos probados favoreció el mayor crecimiento de la raíz en las plantas de *Antirrhinum majus*, como se apreció al encontrar diferencias significativas entre tratamientos homólogos en dosis y tipo de fracción granulométrica, pero diferente pH (T<sub>1</sub> vs T<sub>7</sub>, T<sub>4</sub> vs T<sub>10</sub>, T<sub>5</sub> vs T<sub>11</sub>, T<sub>14</sub> vs T<sub>20</sub>, T<sub>16</sub> vs T<sub>22</sub>) (Tabla No.51, Figura No. 26).

El testigo junto con algunos sustratos a base de arcillas o CAH alcalinos (T<sub>7</sub>, T<sub>9</sub> y T<sub>11</sub>) mostraron las menores longitudes de la raíz y fueron diferentes a los tratamientos más favorables (T<sub>16</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>14</sub>, T<sub>18</sub>, T<sub>24</sub>) que en la mayoría de los casos correspondieron a materiales extraídos del suelo ácido (Tabla No. 51, Figura No. 26)

Al analizar los factores que constituyeron a los tratamientos, se encontraron diferencias significativas entre pH ácido y pH alcalino, destacando el primero por su mayor desarrollo, así también fue más favorable la ausencia de materia orgánica y las plantas cultivadas en sustratos extraídos de las capas superficiales fueron mejores que los de capas blancas y profundas, las dosis no mostraron respuestas diferenciales a nivel estadístico (Tabla No. 51).

Se encontraron interacciones de primer orden con diferencias significativas entre dosis~profundidad, dosis~humus, pH~dosis y pH~profundidad. La de dosis~profundidad, mostró que ambos factores son importantes en el crecimiento de la raíz, pues las medias mostraron, que hubo efectos favorables tanto en las capas superficiales, como en las capas blancas y profundas a dosis de 30 ó 80 mg kg<sup>-1</sup>, así por ejemplo las arcillas de capas superficiales y capas profundas mostraron mayores valores a dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que en la capa blanca hubo un mejor efecto en la dosis de 30 mg kg<sup>-1</sup>.

La interacción dosis~humus mostró que la ausencia de materia orgánica es más favorable y significativa que la dosis, debido a que en ambas dosis, los tratamientos evidenciaron que el mayor desarrollo se encontró sin humus, presentando diferencias significativas con respecto a los tratamientos con materia orgánica.

El efecto pH~dosis evidenció que el pH a dosis de 30 mg kg<sup>-1</sup>, es responsable de esta interacción, pues los tratamientos con arcillas ácidas, mostraron mayor desarrollo de la raíz que los alcalinos, siendo su respuesta similar en ambas dosis.

La interacción pH~profundidad, definió que los dos factores, tienen el mismo peso en el efecto de interacción, pues hubo resultados semejantes tanto a pH diferente como a

profundidad distinta, encontrándose que en los tratamientos de capas superficiales y blancas, hubo diferencias significativas entre pH ácido y alcalino, siendo más favorable el primero en el desarrollo de la longitud de la raíz (Tabla No. 51).

La interacción de segundo orden que se encontró fue la de dosis-humus-profundidad.

#### 7.5.4. Peso fresco.

Los resultados mostraron que el tratamiento No. 16 dió los máximos pesos, y fue estadísticamente diferente a todos los sustratos probados, el testigo junto con los tratamientos T<sub>2</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub>, T<sub>9-12</sub> y T<sub>23</sub> mostraron los valores más bajos y la mayoría de ellos se caracterizaron por ser distintos a T<sub>3-5</sub>, T<sub>8</sub>, T<sub>13</sub>, T<sub>14</sub>, T<sub>16-22</sub>, T<sub>24</sub> por sus pesos intermedios (Tabla No.52).

El efecto de las dosis aplicadas se observó en algunos tratamientos a base de CAH (T<sub>2</sub> vs T<sub>5</sub>, T<sub>8</sub> vs T<sub>11</sub>) y arcillas (T<sub>13</sub> vs T<sub>16</sub>, T<sub>20</sub> vs T<sub>23</sub>); en tres de estos casos la dosis más baja (30 mg kg<sup>-1</sup>) fue más favorable, sin embargo el T<sub>16</sub> que mostró el valor de peso fresco más alto y dispar con el resto de tratamientos corresponde a la dosis alta (80 mg Kg<sup>-1</sup>) (Tabla No.52).

El efecto de la materia orgánica mostró que no fue favorable, pues al comparar tratamientos con CAH y arcilla, se encontraron diferencias significativas que determinaron mayores valores de peso fresco en sustratos con arcilla (ver los contrastes estadísticos al comparar T<sub>2</sub> vs T<sub>14</sub>, T<sub>4</sub> vs T<sub>16</sub>, T<sub>7</sub> vs T<sub>19</sub>, T<sub>9</sub> vs T<sub>21</sub>, T<sub>12</sub> vs T<sub>24</sub>) (Tabla No.52).

Los diferentes rangos de pH, asociados a las fracciones utilizadas como sustrato mostraron que en la mayoría de tratamientos las plantas cultivadas en medios ácidos respondieron con valores de peso fresco más alto, como se aprecia al encontrar diferencia

estadística significativa entre los tratamientos  $T_1$  vs  $T_7$  ,  $T_5$  vs  $T_{11}$  ,  $T_{16}$  vs  $T_{22}$  ,  $T_{17}$  vs  $T_{23}$  (Tabla No.52).

Al analizar los efectos de los factores independientes del tratamiento en que participaron , se encontró al igual que en la longitud del tallo y raíz, valores mayores en plantas cultivadas en sustrato ácidos, la ausencia de materia orgánica, también promovió mayor peso, las capas superficiales fueron favorables con respecto a las profundas y blancas, en está respuesta la dosis de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$ , participó en el incremento del peso. Los cuatro factores, analizados mostraron diferencias estadísticas significativas (Tabla No. 52).

Fue la variable de respuesta con mayor número de interacciones primarias y secundarias significativas, dentro de las primeras se encontraron pH~dosis, pH~humus, pH~profundidad, dosis~humus, dosis~profundidad, humus~profundidad.

La interacción pH~dosis, mostró que el efecto favorable, para producir mayor peso fresco, se encontró en la dosis de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$  y el pH ácido. En cuanto a la relación entre pH~humus, también se observó la mejor respuesta en pHs ácidos, sin materia orgánica.

Para pH~profundidad, se vió que los tratamientos de la capa superficial ácida fueron de mayores pesos que los restantes y solo estadísticamente iguales a los tratamientos ácidos de la capa profunda.

En la interacción dosis~humus, se observó, que los tratamientos sin humus fueron de mayores pesos, que en los que contenían humus, aunque tuvieran distintas dosis.

La interacción dosis~profundidad, mostró que el efecto, se encontró por las dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup>, de las capas superficiales y profundas, ya que fueron significativamente distintas a las restantes medias de comparación.

La de humus~profundidad, evidenció que las diferencias, se atribuyeron a la ausencia de humus en capas superficiales y profundas.

Las interacciones de segundo orden fueron pH~dosis~humus, pH~dosis~profundidad, y dosis~humus~profundidad.

#### **7.5.5 Porcentaje de supervivencia.**

Los porcentajes de supervivencia encontrados en la mayoría de los tratamientos oscilaron entre 80~90% (Tabla No.53), debido a que cubrieron de igual forma los requerimientos mínimos para lograr una supervivencia homogénea. Dentro de estas características favorables, podemos señalar tanto la concentración de macronutrientes como de micronutrientes (Gráficas No.5~8, 28~31; Tablas No.11~13, 43~45), como los niveles no tóxicos de metales (Tablas No.14 y 46), los índices de humedad ambiental (50-60%), oxígeno ( $30-40 \times 10^{-8} \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) y temperatura (20-25 °C) en el invernadero, así como las condiciones sanitarias, de viabilidad y calidad de la semilla.

Los porcentajes de supervivencia más bajos se encontraron en tratamientos a base de arcillas o CAH alcalinos extraídos de la capa superficial o de la profunda (Tabla No.53), por lo que esta respuesta se atribuyó a las características desfavorables de concentración de iones sodio (Gráfica No. 32 y No. 34) en las fracciones que se utilizaron como sustrato.

La aplicación de diferentes dosis en la mayoría de los tratamientos no produjo ningún efecto en el porcentaje de supervivencia. Los únicos que mostraron diferencias significativas con respecto a dosis fueron los tratamientos a base de CAH ( $T_7$  vs  $T_{10}$ ) y arcillas ( $T_{19}$  vs  $T_{22}$ ) extraídas de capas superficiales alcalinas (Tabla No.53), en estos se encontró el menor porcentaje de supervivencia a dosis altas ( $80 \text{ mg kg}^{-1}$ ), lo cual se explicó por la mayor concentración de sodio en el sustrato (Gráfica No. 32).

La presencia de materia orgánica tampoco promovió diferencias estadísticas en el porcentaje de supervivencia, salvo en los tratamientos  $T_7$  vs  $T_9$  y  $T_{10}$  vs  $T_{22}$ , cuyo sustrato provenía de capas superficiales alcalinas; en estos se observó que las arcillas produjeron la respuesta más favorable con respecto a los CAH (Tabla No.53), lo cual se atribuyó al menor contenido de sodio intercambiable (Gráfica No. 32) y soluble. Este último debió disminuir por el tratamiento a base de lavados que se dió al CAH para eliminar el contenido de materia orgánica y obtener la fracción arcilla.

El pH fue el factor definitivo para promover diferencias estadísticas significativas en los porcentajes de supervivencia, hubo mejores respuestas en tratamientos con sustratos extraídos del suelo ácido; en la mayoría se encontraron diferencias significativas entre tratamientos homólogos en dosis y presencia de materia orgánica, pero diferente pH ( $T_1$  vs  $T_7$ ,  $T_3$  vs  $T_9$ ,  $T_4$  vs  $T_{10}$ ,  $T_6$  vs  $T_{12}$ ,  $T_{15}$  vs  $T_{21}$ ,  $T_{16}$  vs  $T_{22}$ ,  $T_{18}$  vs  $T_{24}$ ) (Tabla No.53). lo que se justificó porque bajo este pH ácido se promueve la mayor solubilidad de micronutrientes, los cuales a su vez estuvieron en concentraciones más altas en las fracciones extraídas del suelo ácido (Tabla No. 14), además hubo ausencia de problemas de salinidad y sodicidad (Gráfica

No. 6~8), lo que fue más evidente cuando se compararon tratamientos con sustratos extraídos de capas blancas ( $T_2$  vs  $T_8$ ,  $T_5$  vs  $T_{11}$ ,  $T_{14}$  vs  $T_{20}$ ,  $T_{17}$  vs  $T_{23}$ ) y no se encontraron diferencias significativas (Tabla No.53), precisamente porque la concentración de sodio intercambiable (Gráfica No. 33) fue baja en estas fracciones de la capa blanca alcalina.

El testigo presentó diferencias significativas con respecto a los mejores tratamientos.

Al analizar los factores que participaron en los efectos diferenciales de supervivencia, se encontraron diferencias significativas a pHs distintos, siendo más favorable el ácido, también la ausencia de materia orgánica fue más favorable y la capa blanca destacó por sus valores mayores de supervivencia, la capa superficial fue de índices intermedios y en la profunda se encontraron los menores. Las dosis no mostraron diferencias significativas (Tabla No. 53).

Se encontraron interacciones significativas de primer orden pH~dosis, pH~humus, humus~profundidad y dosis~profundidad.

La de pH~dosis, mostró que el pH alcalino, es menos favorable que el ácido, no importando, la dosis, pues se encontraron diferencias significativas entre diferentes pHs.

En la interacción pH~humus, se observó que los tratamientos ácidos, con o sin humus fueron iguales, con mayor porcentaje de supervivencia, que los alcalinos, por tanto el factor primordial, significativo fue el pH.

La interacción humus~profundidad, mostró que los tratamientos con arcilla de capas superficiales y blancas, fueron de mayor porcentaje de supervivencia, que los de la capa



profunda, así también que los CAH de capas superficiales fueron iguales que los CAH y arcillas de capas profundas.

Dentro de la interacción dosis~profundidad, se observó que la profundidad fue más significativa, para esta respuesta, ya que hubo contrastes entre tratamientos de capas blancas, con mayor porcentaje de supervivencia, con los de capas superficiales de valores intermedios y los de capas profundas con los menores porcentajes, la dosis fue poco perceptible en su efecto.

Las interacciones de segundo orden encontradas fueron pH~dosis ~humus, pH~dosis ~profundidad, dosis~humus~profundidad.

#### **7.5.6 Número de hojas por planta**

El efecto significativo del pH se apreció en función de las diferencias encontradas entre los tratamientos T<sub>16</sub> vs T<sub>22</sub> (Tabla No. 54)

El efecto del contenido de materia orgánica no fue estadísticamente significativo, sin embargo se encontró una tendencia a mayor número de hojas en muestras sin materia orgánica, excepto en el caso de los tratamiento No. 5 y 6 con materia orgánica. que produjeron mayor desarrollo foliar. En cuanto al efecto de las dosis altas y bajas, sólo se observaron entre los tratamientos 13 y 16 de arcillas ácidas de capas superficiales; hubo respuesta favorable en la dosis más alta (80 mg kg<sup>-1</sup>) (Tabla No.54).

El testigo fue el tratamiento que promovió la formación de menor número de hojas en las plantas y fue estadísticamente diferente a los tratamientos No. 16, 14, 4, correspondientes a sustratos extraídos del suelo ácido.

Al analizar los efectos de los factores independientes, se observó que hubo diferencias en cuanto a pH, presencia de materia orgánica y profundidad. La reacción ácida, los sustratos con arcillas sin humus y los sustratos extraídos de capas superficiales favorecieron el incremento en el número de hojas, las diferentes dosis no tuvieron efecto diferencial (Tabla No. 54).

Sólo hubo interacciones significativas entre dosis~profundidad y en humus~profundidad, siendo atribuido el primer efecto a la dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup> de las capas superficiales, que se diferenció de los restantes medios. Mientras que el segundo se estableció por la ausencia de humus, pues la arcilla de la capa superficial fue diferente a las restantes medias, por su mayor número de hojas. No se presentaron interacciones de segundo orden.

En todas las respuestas evaluadas, el tratamiento No. 16 siempre presentó resultados muy dispares con el resto de los tratamientos, por ello se hicieron evidentes todos los factores que intervinieron en el mismo como son la acidez y la carencia de materia orgánica (Tabla No.49~54).

De acuerdo con las Tablas No.49~54, los tratamientos que fueron más favorables en todas las respuestas evaluadas fueron el T<sub>1</sub>, T<sub>4,6</sub>, T<sub>13-16</sub> y el T<sub>19</sub>, la mayor parte de las cuales correspondieron a sustratos extraídos del suelo ácido de San Gregorio Atlapulco.

Los procesos que pudieron intervenir en el desarrollo favorable de la planta *A. majus* en medios ácidos, se atribuyeron a varias características, como son las concentraciones de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg), la menor cantidad de sodio, (Tablas No.11, Gráficas No. 5~8), a presencia de micronutrientes hierro, cobre, cobalto y zinc (Tabla No. 14).

Los grupos funcionales definidos dentro de los espectros de IR (Gráfica No.10) promovieron altas capacidades de quelación que influyeron en la absorción de nutrientes; asimismo en la mayoría de los casos se encontró la concentración más alta de polisacáridos (Tablas No.15 y 47), que podrían inhibir la precipitación de fósforo y promover la de hierro y aluminio. Asimismo, son importantes en la nutrición vegetal, azúcares como la xilocetosa, que se ha demostrado que favorece la germinación de semillas y la elongación de raíces (Cheshire, 1979).

En función de la mayor simetría de los espectros de difracción de rayos X, se dedujo que los minerales meteorizables como feldespatos y micas se encontraron en mayor proporción en la fracción de arcilla ácida (Gráficas No. 11~12 y 34).

En los tratamientos ensayados, la obtención de nutrientes a partir de minerales primarios o arcillosos pudo tener lugar por el efecto de solubilización por ácidos orgánicos, pues estos, se han asociado a la disolución y movilización de elementos de rocas y minerales a través de la reacción de su radical COOH (Tan, 1986).

Durante la quelación de los minerales con ácidos orgánicos, se promueve la solubilidad de fosfatos y minerales silicatados como feldespatos o micas, lo que origina formas solubles de fósforo, potasio, calcio, magnesio y varios elementos traza.

La presencia de ácidos orgánicos en el suelo aunado a los productos metabólicos de la planta pudo generar que en las fracciones utilizadas como sustrato se encontraran cantidades considerables de ácidos orgánicos. En las chinampas se promueven condiciones anaerobias dadas por períodos importantes de inundación, que conducen a la permanencia abundante de

ácidos orgánicos; el orden de concentración encontrado es el siguiente: acético > butirico > fórmico > fumárico  $\equiv$  propiónico  $\equiv$  valérico  $\equiv$  succínico  $\equiv$  láctico (Stevenson, 1994).

La presencia de estos ácidos es importante, pues se han encontrado asociados a partículas arcillosas, donde intervienen en la quelación de nutrientes necesarios para el desarrollo de las plantas; quizás este proceso debió influir en la accesibilidad del fósforo a la planta de *A. majus*. Asimismo, el pH ácido contribuyó a la máxima disponibilidad, habiéndose descrito que los valores óptimos oscilan entre 5.5 y 7 (Tisdale, 1987 ; Alexander, 1980).

La respuesta diferencial en el desarrollo del tallo de la planta se asoció de forma predominante a la abundancia y disponibilidad del fósforo, pues en el caso de *Antirrhinum majus*, se ha mencionado que es más importante que el nitrógeno (Larson, 1988).

El fósforo se ha asociado con la rápida madurez de los cultivos, con el incremento del crecimiento de las raíces. Su carencia es acompañada por marcada reducción del crecimiento de la planta así como con la presencia de coloraciones amarillas en las partes viejas de las hojas. Los compuestos organofosforados son esenciales para la fotosíntesis, la transformación de carbohidratos y compuestos afines, glícolisis, metabolismo de aminoácidos, de lípidos, del azufre y diversas oxidaciones biológicas (Tisdale, 1987).

En las etapas luminosas de la fotosíntesis hay reducción de  $\text{NADP}^+$  y fosforilación del ADP mientras que en las oscuras se emplea el NADPH y al ATP para reducir el  $\text{CO}_2$  a hexosa.. El catabolismo de productos catabólicos de reserva se acompaña de energía en forma de ATP. Recíprocamente, la energía química necesaria para las rutas biosintéticas depende de la desfosforilación de ATP. (Lehninger, 1989).

La retención del fósforo debió darse en la fracción arcillosa, pues la presencia de fierro y aluminio (Tabla No. 14) favorece este proceso. Por ello, en la mayor parte de las fracciones extraídas del suelo ácido, fueron más altos sus contenidos de fósforo (Gráfica No. 5 y No.28).

También es interesante analizar la presencia de calcio, magnesio y fierro bajo condiciones ácidas y alcalinas, pues las condiciones alcalinas se asocian a altas concentraciones de carbonatos, poco solubles, disminuyendo su disponibilidad.

La deficiencia de calcio en las plantas de *Antirrhinum majus* afecta el desarrollo radicular, ya que este es esencial para la formación de paredes celulares primarias en las áreas meristemáticas, asimismo la deficiencia de magnesio se asocia a la clorosis y necrosis intervenal de hojas; se ha encontrado un antagonismo entre altas concentraciones de nitrógeno y el aprovechamiento de magnesio.

El desarrollo radicular anormal en la planta de *A. majus* se ha asociado también a la deficiencia de Fe y a la alta concentración de sales solubles (Larson, 1988).

El pH ácido permite solubilizar con mayor eficiencia los nutrientes, lo cual no ocurre en valores alcalinos, pues se promueve la precipitación haciéndose inaccesibles a las plantas.

La disponibilidad de los nutrientes también se asoció a la forma química del material orgánico, pues los análisis realizados para la caracterización de los ácidos húmicos (Tabla No. 5, 21, 37) mostraron altos grados de complejidad que originaron degradación lenta, por esto la presencia de materia orgánica en las arcillas, no fue favorable.

La presencia de ácidos aromáticos como el benzoico, *p*-hidroxibenzoico, protocateico, *p*-cumárico, vainillico y ferúlico, encontrados como constituyentes de las ligninas y sustancias

húmicas en suelos, pudieron actuar como inhibidores del crecimiento de las plantas. Este efecto se ha descrito en cultivos de maíz, arroz, frijol de soya, caña de azúcar y trigo. Sin embargo, si existe rápida degradación de los fenoles, se promueve actividad microbiana y se elimina la toxicidad (Marschner, 1995).

Las poblaciones microbianas pudieron disminuir como consecuencia de la descomposición de productos de la lignina que se ha descrito reduce de forma significativa la germinación de esporas y el crecimiento de ciertos hongos. Se ha visto que ciertos ácidos aromáticos frecuentemente en el suelo tienen marcadas propiedades fungitóxica a concentraciones de  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  M. Por lo que se les ha atribuido el control de ciertas enfermedades producidas por agentes patógenos (Stevenson, 1994).

El tratamiento que se aplicó a las arcillas para eliminar su contenido de materia orgánica (oxidación con  $H_2O_2$ , lavado y centrifugación) también debió influir en el mejor desarrollo de las plantas cultivadas en sustratos con arcillas (Tabla No. 49~54), ya que probablemente promovió que los iones establecidos en los sitios del complejo de cambio de la arcilla quedaran más disponibles y fáciles de absorber por las plantas.

La respuesta favorable en la mayoría de los tratamientos en los que se utilizó como sustrato material arcilloso extraído de la capa blanca, aún a pesar de su menor concentración de iones de calcio, magnesio, fósforo y nitrógeno (Gráficas No.28, 30, Tabla No.43) se atribuyó a la escasa cantidad de iones sodio y a la presencia de altas concentraciones de silicio, (Gráfica No. 30, Tabla No. 48). De acuerdo con Marschner (1995), los silicatos asociados a

altas concentraciones de fósforo e insuficientes de zinc, induce, la toxicidad del fósforo e incrementan la disponibilidad del zinc hacia las plantas.

Existen pocos trabajos en los que se estudie el efecto del silicio sobre el desarrollo y metabolismo de plantas, en la caña de azúcar, se ha concluido que la ausencia de  $\text{Si}^{+4}$  disminuye la incorporación de fosfato inorgánico al ADP, ATP y azúcares fosfatados; en raíces de trigo la presencia de sílice disminuye la proporción de lignina en las paredes celulares e incrementa los contenidos de compuestos fenólicos; esta última respuesta se ha explicado porque el silicio en la pared celular está formando un enlace éster derivado del ácido silícico ( $\text{R}^1\text{-O-Si-O-R}^2$ ). Además, el silicio influye en el contenido y metabolismo de polifenoles dentro del xilema de paredes celulares (Marschner, 1995).

El  $\text{Si}^{+4}$  incrementa la rigidez de la pared celular, y la elasticidad durante la elongación y crecimiento (Raven, 1983). En ciertas especies de dicotiledoneas como el pepino, el Si aumenta la rigidez en hojas maduras e incluso participa en el incremento del contenido de clorofila. El silicio en la epidermis foliar incrementa la resistencia contra hongos patógenos .

Cuando se utiliza al  $\text{Si}^{+4}$  como promotor del crecimiento, se disminuye la toxicidad de manganeso, aluminio y fierro (Ma y Takahashi, 1990)).

Tabla No.49. Número de Semillas germinadas *A. majus* dentro del bioensayo.

Prof.	pH	30 mg kg <sup>-1</sup>		X <sub>30</sub>	80 mg kg <sup>-1</sup>		X <sub>80</sub>	X <sub>CAH</sub>	X <sub>Arcilla</sub>	X
		CAH	Arcilla		CAH	Arcilla				
capa superficial	Acida	4.00 <sup>a</sup> (T <sub>1</sub> )	3.25 <sup>ab</sup> (T <sub>13</sub> )		2.75 <sup>ab</sup> (T <sub>4</sub> )	2.00 <sup>ab</sup> (T <sub>16</sub> )		3.37	2.63	
	Alcalina	3.50 <sup>ab</sup> (T <sub>7</sub> )	4.00 <sup>a</sup> (T <sub>19</sub> )		2.66 <sup>ab</sup> (T <sub>10</sub> )	4.00 <sup>a</sup> (T <sub>22</sub> )		3.08	4.00	
X <sub>Superficial</sub>		3.75	3.62		2.70	3.00				3.26 <sup>a</sup>
capa blanca	Acida	3.25 <sup>ab</sup> (T <sub>2</sub> )	2.25 <sup>ab</sup> (T <sub>14</sub> )		4.00 <sup>a</sup> (T <sub>5</sub> )	3.00 <sup>ab</sup> (T <sub>17</sub> )		3.62	2.62	
	Alcalina	2.75 <sup>ab</sup> (T <sub>8</sub> )	3.50 <sup>ab</sup> (T <sub>20</sub> )		2.25 <sup>ab</sup> (T <sub>11</sub> )	2.25 <sup>ab</sup> (T <sub>23</sub> )		2.50	2.88	
X <sub>Blanca</sub>		3.00	2.87		3.12	2.62				2.90 <sup>a</sup>
capa profunda	Acida	3.00 <sup>ab</sup> (T <sub>3</sub> )	3.25 <sup>ab</sup> (T <sub>15</sub> )		3.25 <sup>ab</sup> (T <sub>6</sub> )	2.50 <sup>ab</sup> (T <sub>18</sub> )		3.12	2.87	
	Alcalina	1.75 <sup>bc</sup> (T <sub>9</sub> )	3.75 <sup>ab</sup> (T <sub>21</sub> )		2.25 <sup>ab</sup> (T <sub>12</sub> )	4.00 <sup>a</sup> (T <sub>24</sub> )		2.00	3.87	
X <sub>profunda</sub>		2.37	3.50		2.75	3.25				2.97 <sup>a</sup>
X <sub>Acida</sub>								3.37 <sup>a</sup>	2.77 <sup>b</sup>	3.04 <sup>a</sup>
X <sub>Alcalina</sub>								2.53 <sup>b</sup>	3.58 <sup>a</sup>	3.05 <sup>a</sup>
Testigo										2.50 <sup>ab</sup>
X <sub>Total</sub>				3.18 <sup>a</sup>			2.91 <sup>a</sup>	2.95 <sup>a</sup>	3.14 <sup>a</sup>	3.04 <sup>a</sup>

Números entre paréntesis corresponden al número de tratamiento, que son un promedio de 4 repeticiones. Números en negrilla son valores promedio totales de efectos principales. Números sombreados y en cursiva son interacciones de primer orden. Valores numéricos con distinta literal, difieren significativamente ( $P < 0.05$ ). X=media. X<sub>30</sub> dosis de 30 mg kg<sup>-1</sup>, X<sub>80</sub> dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup>.



Tabla No. 50. Longitud del tallo (cm) de *A. majus* dentro del bioensayo.

Prof.	pH	30 mg kg <sup>-1</sup>		80 mg kg <sup>-1</sup>		X <sub>CAII</sub>	X <sub>Arcilla</sub>	X		
		CAH	Arcilla	X <sub>30</sub>	CAH				Arcilla	X <sub>80</sub>
Superficial	Acida	3.05 <sup>b</sup> (T <sub>1</sub> )	3.18 <sup>b</sup> (T <sub>13</sub> )		3.06 <sup>b</sup> (T <sub>4</sub> )	6.37 <sup>a</sup> (T <sub>16</sub> )				
	Alcalina	2.29 <sup>b</sup> (T <sub>7</sub> )	3.25 <sup>b</sup> (T <sub>19</sub> )		1.94 <sup>c</sup> (T <sub>10</sub> )	3.28 <sup>b</sup> (T <sub>22</sub> )				
X <sub>superficial</sub>		2.67	3.21		2.50	4.82		3.30 <sup>a</sup>		
Blanca	Acida	2.62 <sup>b</sup> (T <sub>2</sub> )	2.84 <sup>b</sup> (T <sub>14</sub> )		2.73 <sup>b</sup> (T <sub>5</sub> )	2.30 <sup>b</sup> (T <sub>17</sub> )				
	Alcalina	2.05 <sup>bc</sup> (T <sub>8</sub> )	2.19 <sup>b</sup> (T <sub>20</sub> )		1.30 <sup>c</sup> (T <sub>11</sub> )	1.46 <sup>c</sup> (T <sub>23</sub> )				
X <sub>Blanca</sub>		2.33	2.51		2.01	1.88		2.18 <sup>b</sup>		
Profunda	Acida	2.51 <sup>b</sup> (T <sub>3</sub> )	2.79 <sup>b</sup> (T <sub>15</sub> )		2.92 <sup>b</sup> (T <sub>6</sub> )	2.55 <sup>b</sup> (T <sub>18</sub> )				
	Alcalina	1.50 <sup>c</sup> (T <sub>9</sub> )	1.41 <sup>c</sup> (T <sub>21</sub> )		1.79 <sup>c</sup> (T <sub>12</sub> )	2.77 <sup>b</sup> (T <sub>24</sub> )				
X <sub>profunda</sub>		2.00	2.10		2.35	2.66		2.28 <sup>b</sup>		
X <sub>Acida</sub>		2.73	2.93		2.90	3.74		3.07 <sup>a</sup>		
X <sub>Alcalina</sub>		1.94	2.28		1.68	2.50		2.10 <sup>b</sup>		
Testigo								0.87 <sup>c</sup>		
X <sub>total</sub>				2.47 <sup>a</sup>			2.70 <sup>a</sup>	2.31 <sup>b</sup>	2.86 <sup>a</sup>	2.58

Números entre paréntesis corresponden al número de tratamiento, que son un promedio de 4 repeticiones. Números en negrilla son valores promedio totales de efectos principales. Números sombreados y en cursiva son interacciones de primer orden. Valores numéricos con distinta literal, difieren significativamente ( $P < 0.05$ ). X=media. X<sub>30</sub> dosis de 30 mg kg<sup>-1</sup>, X<sub>80</sub> dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup>

Tabla No. 51 Longitud de raíz (cm) de *A. majus* dentro del bioensayo.

Prof.	pH	30 mg kg <sup>-1</sup>		80 mg kg <sup>-1</sup>		X <sub>30</sub>	X <sub>80</sub>	X <sub>CAH</sub>	X <sub>Arcilla</sub>	X
		CAH	Arcilla	CAH	Arcilla					
Superficial	Acida	3.56 <sup>a</sup> (T <sub>1</sub> )	3.69 <sup>a</sup> (T <sub>13</sub> )		3.62 <sup>a</sup> (T <sub>4</sub> )	4.74 <sup>a</sup> (T <sub>16</sub> )				3.90 <sup>a</sup>
	Alcalina	1.90 <sup>bc</sup> (T <sub>7</sub> )	3.15 <sup>b</sup> (T <sub>19</sub> )		2.66 <sup>bc</sup> (T <sub>10</sub> )	2.58 <sup>bc</sup> (T <sub>22</sub> )				2.57 <sup>b</sup>
X <sub>Superficial</sub>		2.73	3.42		3.14	3.66				3.23 <sup>a</sup>
Blanca	Acida	2.41 <sup>bc</sup> (T <sub>2</sub> )	4.23 <sup>a</sup> (T <sub>14</sub> )		3.79 <sup>a</sup> (T <sub>5</sub> )	3.03 <sup>b</sup> (T <sub>17</sub> )				3.36 <sup>a</sup>
	Alcalina	2.30 <sup>bc</sup> (T <sub>8</sub> )	3.15 <sup>b</sup> (T <sub>20</sub> )		1.67 <sup>c</sup> (T <sub>11</sub> )	2.00 <sup>bc</sup> (T <sub>23</sub> )				2.28 <sup>b</sup>
X <sub>Blanca</sub>		2.35	3.69		2.73	2.51				2.82 <sup>b</sup>
Profunda	Acida	2.15 <sup>bc</sup> (T <sub>3</sub> )	2.80 <sup>bc</sup> (T <sub>15</sub> )		2.84 <sup>bc</sup> (T <sub>6</sub> )	4.05 <sup>a</sup> (T <sub>18</sub> )				2.96 <sup>ab</sup>
	Alcalina	1.77 <sup>c</sup> (T <sub>9</sub> )	3.10 <sup>b</sup> (T <sub>21</sub> )		2.57 <sup>bc</sup> (T <sub>12</sub> )	3.46 <sup>a</sup> (T <sub>24</sub> )				2.74 <sup>ab</sup>
X <sub>profunda</sub>		1.96	2.95		2.70	3.75				2.84 <sup>ab</sup>
X <sub>Acida</sub>		2.70	3.57		3.41	3.94				3.41 <sup>a</sup>
X <sub>Alcalina</sub>		1.94	3.13		2.30	2.68				2.52 <sup>a</sup>
Testigo										1.57 <sup>c</sup>
X <sub>total</sub>				2.85 <sup>a</sup>			3.08 <sup>a</sup>	2.60 <sup>a</sup>	3.33 <sup>a</sup>	2.96

Números entre paréntesis corresponden al número de tratamiento, que son un promedio de 4 repeticiones. Números en negrilla son valores promedio totales de efectos principales. Números sombreados y en cursiva son interacciones de primer orden. Valores numéricos con distinta literal, difieren significativamente ( $P < 0.05$ ). X=media. X<sub>30</sub> dosis de 30 mg kg<sup>-1</sup>, X<sub>80</sub> dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup>.

Tabla No.52. Peso fresco de *A. majus* dentro del bioensayo.

Prof.	pH	30 mg kg <sup>-1</sup>		80 mg kg <sup>-1</sup>		X <sub>80</sub>	X <sub>CAH</sub>	X <sub>Arcilla</sub>	X	
		CAH	Arcilla	X <sub>30</sub>	CAH					Arcilla
Superficial	Acida	0.13 <sup>c</sup> (T <sub>1</sub> )	0.18 <sup>c</sup> (T <sub>13</sub> )		0.19 <sup>c</sup> (T <sub>4</sub> )	0.77 <sup>n</sup> (T <sub>16</sub> )			0.32 <sup>n</sup>	
	Alcalina	0.07 <sup>d</sup> (T <sub>7</sub> )	0.20 <sup>c</sup> (T <sub>19</sub> )		0.13 <sup>cd</sup> (T <sub>10</sub> )	0.16 <sup>c</sup> (T <sub>22</sub> )			0.15 <sup>b</sup>	
X <sub>superficial</sub>		0.10	0.19		0.16	0.46			0.23 <sup>a</sup>	
Blanca	Acida	0.11 <sup>d</sup> (T <sub>2</sub> )	0.25 <sup>bc</sup> (T <sub>14</sub> )		0.15 <sup>c</sup> (T <sub>5</sub> )	0.25 <sup>bc</sup> (T <sub>17</sub> )			0.19 <sup>b</sup>	
	Alcalina	0.16 <sup>c</sup> (T <sub>8</sub> )	0.17 <sup>c</sup> (T <sub>20</sub> )		0.05 <sup>d</sup> (T <sub>11</sub> )	0.08 <sup>d</sup> (T <sub>23</sub> )			0.11 <sup>b</sup>	
X <sub>Blanca</sub>		0.13	0.21		0.10	0.16			0.15 <sup>c</sup>	
Profunda	Acida	0.16 <sup>c</sup> (T <sub>3</sub> )	0.19 <sup>c</sup> (T <sub>15</sub> )		0.16 <sup>cd</sup> (T <sub>6</sub> )	0.35 <sup>bc</sup> (T <sub>18</sub> )			0.22 <sup>ab</sup>	
	Alcalina	0.06 <sup>d</sup> (T <sub>9</sub> )	0.21 <sup>bc</sup> (T <sub>21</sub> )		0.07 <sup>d</sup> (T <sub>12</sub> )	0.29 <sup>bc</sup> (T <sub>24</sub> )			0.16 <sup>b</sup>	
X <sub>profunda</sub>		0.11	0.20		0.11	0.32			0.18 <sup>b</sup>	
X <sub>acida</sub>							0.15 <sup>bc</sup>	0.33 <sup>a</sup>	0.24 <sup>a</sup>	
X <sub>alcalina</sub>							0.08 <sup>c</sup>	0.19 <sup>b</sup>	0.14 <sup>b</sup>	
Testigo									0.02 <sup>d</sup>	
X <sub>total</sub>				0.15 <sup>b</sup>			0.22 <sup>a</sup>	0.12 <sup>b</sup>	0.26 <sup>a</sup>	0.19

Números entre paréntesis corresponden al número de tratamiento, que son un promedio de 4 repeticiones. Números en negrilla son valores promedio totales de efectos principales. Números sombreados y en cursiva son interacciones de primer orden. Valores numéricos con distinta literal, difieren significativamente ( $P < 0.05$ ). X=media. X<sub>30</sub> dosis de 30 mg kg<sup>-1</sup>, X<sub>80</sub> dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup>.

Tabla No. 53. Porcentaje de supervivencia de *A. majus* dentro del bioensayo.

Prof.	pH	30 mg kg <sup>-1</sup>		X <sub>30</sub>	80 mg kg <sup>-1</sup>		X <sub>80</sub>	X <sub>CAH</sub>	X <sub>Arcilla</sub>	X
		CAH	Arcilla		CAH	Arcilla				
Superficial	Acida	81.22 <sup>a</sup> (T <sub>1</sub> )	82.70 <sup>a</sup> (T <sub>13</sub> )		89.58 <sup>a</sup> (T <sub>4</sub> )	98.28 <sup>a</sup> (T <sub>16</sub> )				
	Alcalina	43.75 <sup>b</sup> (T <sub>7</sub> )	81.25 <sup>a</sup> (T <sub>19</sub> )		8.33 <sup>c</sup> (T <sub>10</sub> )	53.44 <sup>b</sup> (T <sub>22</sub> )				
X <sub>Superficial</sub>		62.48	81.97		48.95	75.86				67.31 <sup>b</sup>
Blanca	Acida	82.50 <sup>a</sup> (T <sub>2</sub> )	85.00 <sup>a</sup> (T <sub>14</sub> )		87.80 <sup>a</sup> (T <sub>5</sub> )	82.50 <sup>a</sup> (T <sub>17</sub> )				
	Alcalina	86.36 <sup>a</sup> (T <sub>8</sub> )	87.50 <sup>a</sup> (T <sub>20</sub> )		85.00 <sup>a</sup> (T <sub>11</sub> )	85.00 <sup>a</sup> (T <sub>23</sub> )				
X <sub>Blanca</sub>		84.43	86.25		86.25	83.75				85.17 <sup>a</sup>
Profunda	Acida	89.50 <sup>a</sup> (T <sub>3</sub> )	89.87 <sup>a</sup> (T <sub>15</sub> )		88.75 <sup>a</sup> (T <sub>6</sub> )	80.85 <sup>a</sup> (T <sub>18</sub> )				
	Alcalina	00.00 <sup>c</sup> (T <sub>9</sub> )	6.25 <sup>c</sup> (T <sub>21</sub> )		12.50 <sup>c</sup> (T <sub>12</sub> )	31.25 <sup>bc</sup> (T <sub>24</sub> )				
X <sub>profunda</sub>		44.75	48.06		50.62	56.05				49.87 <sup>c</sup>
X <sub>acida</sub>							86.50 <sup>a</sup>	87.19 <sup>a</sup>		86.52 <sup>a</sup>
X <sub>alcalina</sub>							39.32 <sup>b</sup>	57.46 <sup>b</sup>		48.39 <sup>b</sup>
Testigo										25.00 <sup>bc</sup>
X <sub>total</sub>				67.99 <sup>a</sup>			66.91 <sup>b</sup>	62.91 <sup>b</sup>	71.99 <sup>a</sup>	67.45

Números entre paréntesis corresponden al número de tratamiento, que son un promedio de 4 repeticiones. Números en negrilla son valores promedio totales de efectos principales. Números sombreados y en cursiva son interacciones de primer orden. Valores numéricos con distinta literal, difieren significativamente ( $P < 0.05$ ). X=media. X<sub>30</sub> dosis de 30 mg kg<sup>-1</sup>. X<sub>80</sub> dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup>.

Tabla No 54. Número de hojas en *A. majus* dentro del bioensayo.  
30 mg kg<sup>-1</sup> 80 mg kg<sup>-1</sup>

Prof.	pH	CAH	Arcilla	X <sub>30</sub>	CAH	Arcilla	X <sub>80</sub>	X <sub>CAH</sub>	X <sub>arcilla</sub>	X
Superficial	Acida	4.50 <sup>bc</sup> (T <sub>1</sub> )	5.25 <sup>bc</sup> (T <sub>13</sub> )		6.25 <sup>ab</sup> (T <sub>4</sub> )	9.00 <sup>a</sup> (T <sub>16</sub> )				
	Alcalina	3.25 <sup>bc</sup> (T <sub>7</sub> )	5.00 <sup>bc</sup> (T <sub>19</sub> )		3.00 <sup>bc</sup> (T <sub>10</sub> )	5.00 <sup>bc</sup> (T <sub>22</sub> )				
<b>X<sub>Superficial</sub></b>		<b>3.87</b>	<b>5.12</b>		<b>4.62</b>	<b>7.00</b>				<b>5.15<sup>a</sup></b>
Blanca	Acida	4.00 <sup>bc</sup> (T <sub>2</sub> )	5.50 <sup>ab</sup> (T <sub>14</sub> )		4.25 <sup>bc</sup> (T <sub>5</sub> )	4.25 <sup>bc</sup> (T <sub>17</sub> )				
	Alcalina	3.25 <sup>bc</sup> (T <sub>8</sub> )	4.25 <sup>bc</sup> (T <sub>20</sub> )		2.75 <sup>bc</sup> (T <sub>11</sub> )	3.00 <sup>bc</sup> (T <sub>23</sub> )				
<b>X<sub>Blanca</sub></b>		<b>3.62</b>	<b>4.87</b>		<b>3.50</b>	<b>3.62</b>				<b>3.90<sup>b</sup></b>
Profunda	Acida	4.00 <sup>bc</sup> (T <sub>3</sub> )	4.25 <sup>bc</sup> (T <sub>15</sub> )		5.25 <sup>bc</sup> (T <sub>6</sub> )	3.75 <sup>bc</sup> (T <sub>18</sub> )				
	Alcalina	3.00 <sup>bc</sup> (T <sub>9</sub> )	3.75 <sup>bc</sup> (T <sub>21</sub> )		4.00 <sup>bc</sup> (T <sub>12</sub> )	4.75 <sup>bc</sup> (T <sub>24</sub> )				
<b>X<sub>profunda</sub></b>		<b>3.50</b>	<b>4.00</b>		<b>4.62</b>	<b>4.25</b>				<b>4.09<sup>b</sup></b>
<b>X<sub>acida</sub></b>										<b>5.02<sup>a</sup></b>
<b>X<sub>alcalina</sub></b>										<b>3.75<sup>b</sup></b>
<b>Testigo</b>										<b>2.25<sup>c</sup></b>
<b>X<sub>total</sub></b>				<b>4.16<sup>a</sup></b>			<b>4.60<sup>a</sup></b>	<b>3.95<sup>b</sup></b>	<b>4.81<sup>a</sup></b>	<b>4.38</b>

Números entre paréntesis corresponden al número de tratamiento, que son un promedio de 4 repeticiones. Números en negrilla son valores promedio totales de efectos principales. Números sombreados y en cursiva son interacciones de primer orden. Valores numéricos con distinta literal, difieren significativamente (P < 0.05). X=media, X<sub>30</sub> dosis de 30 mg kg<sup>-1</sup>, X<sub>80</sub> dosis de 80 mg kg<sup>-1</sup>.

Interacción pH-profundidad,

Interacción pH-humus



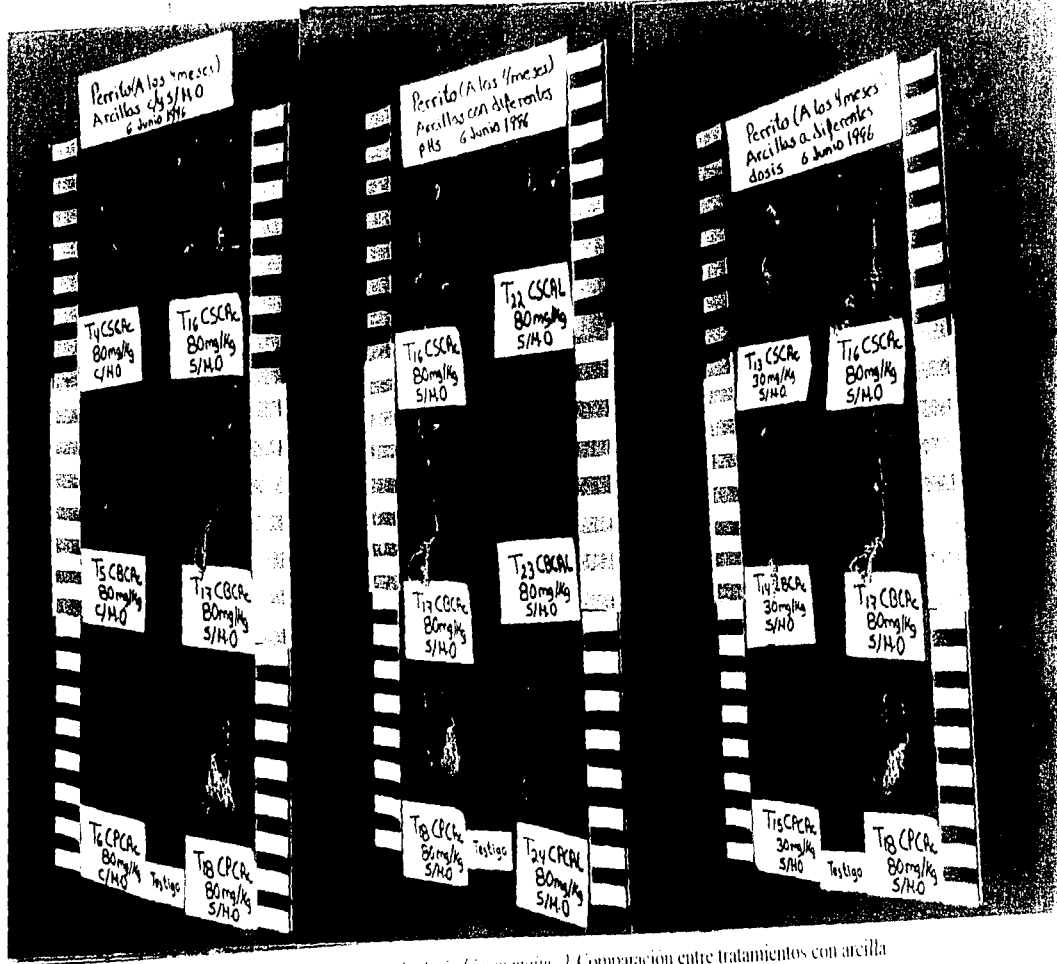


Figura No.26. Plantas de *Antirrhinum majus*. 1. Comparación entre tratamientos con arcilla y complejo arcilla humus. 2. Comparación entre tratamientos con diferentes valores de pH. 3. Comparación entre tratamientos con diferentes dosis.

## 8. CONCLUSIONES

1. La presencia de organominerales fue evidente por los altos porcentajes de carbono en el suelo y en las diferentes fracciones minerales. Se comprobó que la mayor retención de carbono y nitrógeno correspondió a las fracciones más finas. Las relaciones C/N cercanas a valores entre 10 y 12 en la mayor parte de las fracciones caracterizaron a los suelos como de alta actividad biológica potencial.

2. El humus por sus características analíticas se incluyó dentro de los límites de variabilidad del *mull*, excepto el de la capa blanca neutra que pudiera ubicarse como *moder*. El carácter antrópico e hidromorfo del humus se asemeja al tipo *anmoor*. La estabilidad encontrada fue ácida > alcalina > neutra y capa superficial > capa profunda > capa blanca, lo que implicó el mismo orden de polimerización en los AH.

3. En las tres calicatas los metales totales se encontraron en mayores concentraciones en los AH que en los AF. Su abundancia en fracciones orgánicas y minerales, indican predominio de organominerales constituidos por hierro y aluminio, índices intermedios con cobre, níquel y zinc y menores con cobalto, cromo y cadmio. Las concentraciones de metales totales en los tres suelos y en sus diversas fracciones no fueron tóxicas a excepción del cadmio.

4. La retención de los metales totales en la calicata neutra se asoció en mayor proporción a las fracciones minerales, en la ácida a las fracciones orgánicas y en la alcalina tanto a la fracción orgánica como a la mineral. En todas el hierro fue retenido siempre más en la fracción orgánica mientras que el aluminio fue retenido en la fracción mineral.

5. Los polisacáridos de carácter lábil fueron dominantes y se encontraron en mayores concentraciones en CAH que en arcillas. Los más altos contenidos se asociaron a menores porcentajes de metales, por lo que se concluyó que el magnesio, fierro y silicio participaron en su estabilización.

6. La capacidad de intercambio catiónico fue más alta en las fracciones más finas (arcilla y limos) y más baja en las gruesas (arena). Las diferencias encontradas entre CAH y CLF-H con arcillas y limo fino evidenciaron que en las fracciones minerales finas hubo valores más altos de CICT, mientras que en las gruesas, el material orgánico fue el que promovió ésta respuesta.

7. En las fracciones minerales los contenidos de iones intercambiables se encuentran en el orden siguiente: magnesio > calcio > sodio > potasio. Asimismo, las fracciones más gruesas retuvieron altos porcentajes de sodio incluso en los suelos sin problemas de sodicidad, lo que fue muy notorio en las capas blancas. Las fracciones complejadas a material orgánico retuvieron mayor cantidad de sodio que las minerales.

8. Los espectros de difracción de rayos X e infrarrojo demostraron en los suelos presencia de feldspatos, micas y arcillas montmorillonita, illita, caolinita y haloisita, asimismo se detectaron polimorfos de sílice como el ópalo A de origen biogénico y materiales amorfos.

9. La planta *A. majus* mostró las mejores respuestas en su desarrollo en el tratamiento No. 16 a base de sustrato con arcilla extraída de la capa superficial del suelo ácido a dosis de



80 mg kg<sup>-1</sup>, el cual siempre fue diferente estadísticamente al testigo y a los tratamientos restantes.

10. Los efectos de materia orgánica y dosis sobre el desarrollo de la planta *A. majus* fueron variables, en sustratos ácidos se observaron tendencias a mejorar las respuestas a dosis altas (80 mg kg<sup>-1</sup>), mientras que en los alcalinos fue a dosis bajas (30 mg kg<sup>-1</sup>). La materia orgánica en algunos tratamientos dió mejor crecimiento y en otros su ausencia fue más favorable. La profundidad de los sustratos utilizados fue más favorable para los extraídos de capas superficiales.

11. El pH fue definitivo en la mejor respuesta del desarrollo de *A. majus*, se encontró que los valores ácidos de los CAH o arcillas favorecieron el crecimiento con respecto a los alcalinos. Esto se asoció a la menor concentración de iones salinos, a los más altos contenidos de fósforo y a la disponibilidad de micronutrientes generada por la presencia de ácidos orgánicos y por la solubilidad bajo condiciones ácidas.

12. El origen de la capa blanca se asoció a períodos de sequía que contribuyeron a la evaporación del agua del lago y a la acumulación de diatomeas. Los géneros identificados en los suelos fueron típicos de lagos de agua dulce.

13. Los valores de pH ácidos en la calicata (C56), neutros en la C63 y alcalinos en la C69, así como las retenciones de fósforo, micronutrientes y grupos funcionales orgánicos establecen que los suelos chinamperos tienen carga variable.

**14.** La concentración de fósforo en la arcilla de la capa superficial del suelo ácido, indicó la presencia de sitios positivos que pudieron retener al ión  $\text{PO}_4^{-2}$ , mientras que a pH alcalino el OH está cargado negativamente e impide la atracción de aniones.

**15.** Los valores de pK de los grupos  $\text{Al}(\text{OH})_2^{+1}$ ,  $(\text{Al-OH-Si})^{+0.5}$  y  $\text{SiOH}$  sugirieron que la disociación de los dos primeros se manifestó en los suelos alcalinos, mientras que en los ácidos, sólo se presentó la de  $\text{Al}(\text{OH})_2^{+1}$  en la capa superficial y en el neutro tienen lugar la de  $\text{Al-OH-Si}$  en la capa superficial y la de  $\text{Al}(\text{OH})_2^{+1}$  en toda la calicata. El  $\text{SiOH}$  no se disoció en ninguno de los tres suelos.

**9. LITERATURA CITADA**

- Aceves, M.E.** 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Colegio de Posgraduados. Chapingo, México . pp 27-43.
- Aguilera, H.N.; Fuentes, C.E.** 1951. Estudio físicoquímico y espectroscópico de la fracción arcilla de 2 micrones de algunos suelos de Xochimilco. Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural. Tomo XII . pp 101-118.
- Aguilera, H.N.; Fierro, C.E.; Rodríguez, V.J.** 1956. Agregación de arcillas y algunos microorganismos del suelo en microscopía electrónica. Sociedad de Alumnos de la Escuela Nacional de Agricultura No. 56 pp 44-54.
- Aguilera, H.N.; García,C.N; Ramos, B.R et al.** 1987-1994. Rehabilitación de suelos de chinampa y sus relaciones con las plantas cultivadas. Informes Técnicos a Conacyt. Facultad de Ciencias, Laboratorio de Edafología, UNAM.
- Aguilera, H.N.**1989. Tratado de Edafología de México. Tomo I. Laboratorio de Edafología, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias UNAM. 222 pp.
- Aguirre, J.L.** 1993. Estudio edafológico detallado en el parque natural Xochimilco. Memorias del Primer Seminario Internacional de Investigadores de Xochimilco. México.
- Alexander, M.** 1980. Introducción a la microbiología del suelo. AGT Editor. México. pp 127-326
- Alfaro, S.S.**1993. Características edafológicas de los suelos de Xochimilco. Memorias del Primer Seminario Internacional de Investigadores de Xochimilco. México.

- Alloway, B.J. 1990. Heavy metals in soils. Halsted Press John Wiley & Sons. New York pp 130-196.**
- Almendros, G.; Dorado, E.; Polo, A. 1979 Extracción y caracterización de las sustancias húmicas en las fracciones físicas del suelo. Bol.R.Soc.Española Hist.Nat.(Biol), 77:5-28.**
- Almendros, M.G. 1980. Composición y propiedades de la materia orgánica de las principales turberas españolas. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas 125 pp.**
- Almendros, G; Sanz, J. 1991. A structural study on the soil humin fraction. Boron trifluoride-methanol transesterification of soil humin preparation . Soil Biol.Biochem., 23:1147-1154.**
- Almendros, G.; Sanz, J. 1992. A Structural study of alkyl polymers in soil after perborate degradation of humin. Geoderma 53:79-95.**
- Almendros,G.; González-Vila.F.1987. Degradative studies on a soil humin fraction-sequential degradation of inherited humin. Soil Biol. Biochem. 19(5):513-520.**
- Babich, H. Stotzky, G. 1977. Sensitivity of various bacteria, including actinomycetes and fungi, to cadmium and the influence of pH on sensitivity. Appl. Environm. Microbiol. 33: 681-695.**
- Bailey, G.W.; White, J.L. 1970. Factors influencing the adsorption desorption and movement of pesticides in soils. Residue Rev 32:29-92.**
- Baver, L.D. 1956. Soil Physics.. John Wiley and Sons Inc New York , Chapman y Hall.**

- Bloom, P.R. 1981. Metal-organic matter interactions in soils. En R.H. Dowdy et al.,, Eds. Chemistry of the Soil environment, Special Publication 40. American Society of Agronomy, Madison, 1981, pp. 129-150.**
- Bochmann, M. 1994. Organometallics I. Complexes with transition Metal-carbon Bonds. Oxford Science Publications. Series Zeneca pp 1-7.**
- Boyd, S.A.; M.M. Mortland, 1985. Manipulating the activity of immobilized enzymes with different organo-smectite complexes. Experientia 41: 1564-1566.**
- Boyd, A.S.; Mortland, M.M. 1990. Enzyme interactions with clays and clay-organic matter complexes, en Bollog, J.M.; Stotzky, G. Soil Biochemistry. Vol. 6 pp 1-28 Marcel Dekker .New York.USA**
- Brink, R.H.; Jr., Dubach, P.; Lynch, D.L 1959 .Measurement of carbohydrates in soil hidrolizates with anthrone. Soil Sci. 89, 157**
- Brown, G. 1972. The X ray identification and crystal structure of clay minerals. Mineralogical Society. London. 210 pp**
- Brown, G.A.; Newman, C.D.; Rayner, J.H.; Weir, A.H.1978. The structures and chemistry of soil clay minerals. En D.J. Greenland y M.H. Hayes (eds). The Chemistry of soil constituents, pp 29-178. Wiley Chichester, V.K.**
- Buckman, O.H. ; Brady, C.N. 1977. Naturaleza y propiedades de los suelos. Montaner y Simons. S.A. Barcelona, España. pp 135-167.**
- Burns, R.G. 1986. Interaction of enzymes with soil mineral and organic colloids. En P.M. Huang and M. Schnitzer (eds). Interactions of Soil minerals with Natural**

- Organics and Microbes. Spec. Publ. No. 17, 429-451. Soil Science Society of America, Madison Wis.**
- Cajuste, J.L. 1977. Química de suelos con un enfoque agrícola. Colegio de Posgraduados. Chapingo México pp 260-261.**
- Cairns-Smith, A.G.; Hartman, H. 1986. Clay minerals and the origin of life. Cambridge. Univ. Press, Cambridge. 215 pp.**
- Cheng , Y; Schnitzer, M. 1976. Scanning electron microscopy of a humic acid and of a fulvic acid and its metal and clay complexes. Soil Sci.Soc.Am.J. 40:682-686.**
- Cheng , Y.; Stevenson, 1986. Soil Organic matter interactions with trace elements. En Y. Chen; Avnimelech, E. The Role of Organic Matter in modern agriculture. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht. pp 73-116.**
- Chenu, C; Jaunet, A.M. 1992. Cryoscanning electron microscopy of microbial extracellular polysaccharides and their association with minerals. Scanning, 14:360-364**
- Chenu, C. Guerif, J.; Jaunet, A.M. 1994. Polymer bridging : A mechanism of clay and soil structure stabilization by polysaccharides. 15 th World Congress of Soil Science Vol 3a. Commission II Symposia . Mexico. pp 403-410**
- Cheshire, M.V. 1979. Nature and Origin of Carbohydrates in Soils. Academic Press. London, N.Y. 215 pp.**

- Cheshire, M.V.; Bracewell, J.M.; Mundie, C.M.; Robertson, G.W.; Russell, J.D.; Freser, R. 1979. Structural studies on soil polysaccharide. J.Soil Sci. 30: 315-326.**
- Cuanalo, 1990. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo 3a. Ed . Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados, Chapingo, México, 40 pp.**
- Dixon, J.B. 1989. Minerals in soil environments. 2a. Ed. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.**
- Dorado, E; Polo, A; del Río J.1972. Caracterización de los ácidos húmicos por electroforesis y gel filtración. An Edafol.Agrobiol. 31, 693.**
- Duchaufour, Ph. 1984. Edafología. 1. Masson, S.A. España pp. 27-114; 367-408.**
- Echegaray, A.A. 1970. Estudio biológico de algunos suelos del Lago de Texcoco.Rev. Lat. Amer. Microbiol. 12:93-101.**
- England, S.L. ; Lee, H.; Trevors, T.J. 1993. Bacterial survival in soil: effect of clays in protozoa. Soil Biol. Biochem. 25: 525-531.**
- Fanning, D.S.; Rabenhors, M.C; Bigham; J.M. 1993. Colors of acid sulfate soils en "Soil Color" SSA Special publication Number 31. Soil Science Society of America, Inc. Madison Wis. USA pp 91-108.**
- Ford, I. N. 1984. Dinámica Mineral en el Suelo. Algunos Puntos de Referencia para su Estudio. Universidad Autónoma de Chapingo (UACH). México 577 pp.**
- Frimmel, F.H.; Christman, R.F. 1988. Humic Substances and their Role in the environment. John Wiley y Sons, New York.**

- García, C.N.; Aguilera, H.N. 1980. Efectos de las fracciones de materia orgánica (ácidos húmicos) y respuesta en las plantas de maíz. Memorias del XIII Congreso Nacional de la Ciencia del suelo. Toluca, México pp 310-322.**
- García C.N.; Galicia, P.M.; Aguilera, H.N. 1990. Grados de humificación en suelos de chinampa. Primer. Simposio Nacional sobre Degradación de Suelos. Instituto de Geología, UNAM. pp 23-24.**
- García, C.N.; Galicia, P.M.; Aguilera, H.N.; Reyes, O.A. 1994. Organic matter and humic substances contents in chinampa soils from Xochimilco-Tlahuac areas (México). 15 World Congress of Soil Science. International Society of Soil Science pp 368-383. Acapulco, México.**
- García, C.N. 1997. Arcillas del grupo del caolín. En Cordero, B.A. (eds) Apuntes del Curso de Cristalografía de Suelos Sociedad Mexicana de Cristalografía pp 103-125, Instituto de Física, UNAM.**
- Garwood, G.A.; Mortland, M.M.; Pinnavaia, T.J. 1983. Immobilization of glucose oxidase on montmorillonite clay hydrophobic and ionic modes of binding. J.Mol.Catal.22:153-163.**
- Gottlieb, D. 1976. The production and role of antibiotics in soil. J. Antibiot. 29:987-1000.**
- Greenland, D.J.; Hayes, M.H. 1978. The chemistry of Soil Constituents. John Wiley y Sons pp. 320.**



- Haider, K.; Martin, J.P.; Filip, Z. 1975. Humus Biochemistry. En E.A. Paul y A.D. McLaren (ed) ; Soil Biochemistry, Vol. 4 pp 175-234. Marcel Dekker, New York.**
- Halliwell, B.; Gutteridge, J.M. 1986. Iron and free radical reactions: two aspects of antioxidant protections. Trends Biochem. Sci 11:372-375.**
- Hartmann, H.T. 1989. Propagación de Plantas. Principios y Prácticas. Editorial Continental. México. pp 75-204.**
- Hayes, M.H. 1989. Humic Substances II. John Wiley y Sons. N.Y. pp. 593-620**
- Huang, P.M. 1990. Role of soil minerals in transformations of natural organics and xenobiotics in soil. En Bollag J.M & Stotzky, G. (ed) . Soil Biochemistry, Vol. 6 pp 29-115. Marcel Dekker, New York.**
- Jackson, M.L. 1982. Análisis Químicos de Suelos. Omega. Madrid, España. 195 pp**
- Jenkinson, D.S. 1977. Studies on the decomposition of plant material in soil V. The effects of plant cover and soil type on the loss of carbon from <sup>14</sup>C labeled ryegrass decomposing under field conditions. J. Soil Sci. 28: 424-434.**
- Jenkinson, D.S.; Rayner, J.H. 1977. Turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. Soil Sci. 123:298-305.**
- Jiménez, O.; Rojas, R.T.; Del Amo, R.S.; Gómez, P.A. 1990. Pasado, Presente y futuro de las chinampas . Reporte de sostenibilidad 1:23-24. México**
- Kabata, P. A.; Pendias, H. 1992. Trace Elements in Soil and Plants . CRC Press Boca Rat. 89-93.**

- Kilmer, V.J; Younts, S.E; N.C. Brady, N.C. 1968. The Role of Potassium in Agriculture. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, Wis. USA. pp 509.**
- Kiss, S.; Drágan, B. Rádulsecu, D. 1975. Biological significance of enzymes accumulated in Soil. Advan. Agron. 27:25-87.**
- Kononova, M.M. 1982. Materia Orgánica del suelo. Oikos-Tan. Madrid.365 pp.**
- Kumada, K. Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific Societies Press. Tokyo, and Elsevier, Amsterdam.**
- Larson, R.A. 1988. Introducción a la Floricultura. AGT. Editor México pp 95-118.**
- Lehninger, A.L. 1989. Bioquímica. Las Bases moleculares de la estructura y función celular. 2a Ed . Omega.. Barcelona, España.1117 pp.**
- Lowe,L.E. 1975. Fractionation of acid-soluble components of soil organic matter using polivynil pyrrolidone. Can.J.SoilSci. 55:119-126.**
- Ma, J.;Takahashi, E. 1990. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. Plant Soil 126:115-119**
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2.Ed . Academic Press. N.Y. pp 313-436.**
- Martin, J.P.; Zunino, H.; Peirano, P.; Caiozzi, M.; Haider, K. 1982. Decomposition of <sup>14</sup>C-labeled lignins, model humic acid polymers, and fungal melanins in allophanic soils. Soil Biol. Biochem. 14:289-293.**

- Martin, J.P. ; Haider, K. 1986. Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon. En Interactions of soil Minerals with Natural organics and microbes. SSSA. Spec. Pobl. No.17. Soil Science Society of America. Madison, USA.**
- Marshman, N.A.; Marshall, K.C. 1981. Bacterial growth on proteins in the presence of clay minerals. Soil Biol.Biochem 13:127-134.**
- Mercado, S.I.; Aguilera, H.N.; García, C.N.; Martín, M.F. 1992. Estudio de la materia orgánica de suelos de chinampa. En Tovar, S.J.y Quintero, L.(eds). La investigación edafológica en México 1991-1992. Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del suelo. México pp. 92.**
- Mercado, S.I. 1993. Respuesta de un suelo salino-sódico de San Luis Tlaxiátemalco , D.F a la aplicación de mejoradores biológico, químico, e hidrotécnico a nivel invernadero. Tesis M en C (Edafología), Fac. Ciencias, UNAM, 120 pp.**
- Mercado, S.I.; Aguilera, H.N.; García, C.N.; Martín, M.F. 1995. Conteridos de lípidos en suelos orgánicos de la zona lacustre Xochimilco-Tláhuac. En Tovar, S.J.L., Ordaz, Ch, Quintero, L. (eds). La investigación edafológica en México 1992-1995. Memorias del XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, México pp 29.**
- Merlet, D. 1971. Mise au point technique concernant extraction et la caracterisation des composés organiques dans les soils. Centre de Pedologie Biologique, CNRS, Nancy Doc. 15-19 pp.**

- Mooser, F.** 1963. La cuenca lacustre del Valle de México. Mesas Redondas para Problemas del Valle de México 12-16 Nov. 1962. Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables. México pp. 3-48.
- Moore, M.D.; Reynold, R.C.** 1989. X ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press. Oxford 198 pp.
- Mortland, M.M.** 1970. Clay-organic complexes and interactions. Adv. Agron. 22:75-117.
- Mortland, M.M.; Halloran, L.J.** 1976. Polymerization of aromatic molecules on smectites. Soil Sci Soc. Am. J. 40:367-370.
- Mortvedt, J.J; Giordano, P.M.; Lindsay, W.L.** 1983. Micronutrientes en agricultura. AGT. Editor. México. 742 pp.
- Munsell, 1992.** Soil Chart. Edition Munsell. Color Co Baltimore Maryland.
- Newman, A.C.** 1987. Chemistry of Clays and Clay Minerals. Mineralogical Society Monograph No. 6 . Longman Scientific y Technical. 469 pp.
- Norvell, W.A.** 1983. Equilibrio de los quelatos metálicos. En Micronutrientes en Agricultura. AGT. Editor. México. pp 127-152.
- Oades, J.M. Vassallo, A.M.; Waters, A.G.; Wilson, M.A.** 1987. Characterization of organic matter in particle size and density fractions iron a red brown earth by solid state <sup>13</sup>C NMR. Aust. J. Soil Res 25:71-82.
- Ortega, T.E.** 1981. Química de Suelos. UACH. Depto de Suelos. pp 127-129.

- Ortiz, O.M. 1987. Efecto de la salinidad edáfica sobre la distribución de Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup> en dos variedades de *Phaseolus vulgaris* de diferente tolerancia a la salinidad bajo condiciones de invernadero. Tesis M en C (Biología) Facultad de Ciencias, UNAM. 211 pp.**
- Palacios, M.S. 1990. Diagnóstico y evaluación de los riesgos de degradación actual en suelos del ex Lago de Xochimilco. Primer Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Instituto de Geología, UNAM, pp 29-30**
- Paul, E.A.; Van Veen, J.A. 1978. The use of tracers to determine the dynamic nature of organic matter. Trans. Int. Congr. Soil Sci. 11th 3:61-102.**
- Pinnavaia, T.J.; Hall, P.; Cady, S; Mortland, M.M. 1974. Aromatic radical cation formation on the intracrystal surfaces of transition metal layer lattice silicates. J. Phys. Chem. 78:994-999.**
- Pasricha, N.S.; Baddesha, H.S.; Au Lakh, M.S.; Nayyar, V.R. 1987. The quantity-intensity relationships in four different soils as influenced by phosphorus. Soil Sci. 143: 1-4.**
- Prashad, B.; Sinha, M.K. 1980. Physical and chemical characterization of soil and poultry litter humic and fulvic metal complexes. Plant Soil 54:223-232.**
- Raven, J.A. 1983. The transport and function of silicon in plants. Biol. Rev Camb Philos. Soc. 58: 179-207.**

- Reyes, O.A. 1992. Respuestas en el desarrollo del rosal a la adición de mejoradores orgánicos y láminas de lavado en un suelo de chinampa. Tesis Men C (Edafología) Fac. Ciencias, UNAM 162 pp.**
- Ribault, L.L. 1971. Présence d' une pellicule de silice amorphè la surface de cristaux de quartz des formations sableuses. C.R. Acad. Sci.Paris Ser. D. 272:1933-1936.**
- Richards, L.A.; Allison, L.E.; Brown, L.E.; Hayward, J.M.; Berstein,H.E.; Fireman, L.; Pearson, H. ; Wilcox,G.A.; Bower, L.D.; Hatcher, J.T.; Reeve, R.C. 1985. Diagnóstico y rehabilitación. suelos salinos y sódicos. Limusa . México 172 pp.**
- Richardson, J.L.; Daniels, R.B. 1993. Stratigraphic and hydraulic influences on soil color development. En "Soil Color" SSSA Special Publication. Number 31 Soil Science Society of America Inc. Madison, Wisconsin, USA. pp109-125.**
- Ritchie, P.G.; Posher, AM. 1982. The effect of pH and metal binding on the transport properties of humic acids. J Soil Sci. 33:233.247.**
- Rozanov, B.G. 1990. Fundamental genetic system of soil classification. 14 Congress of the International Society of Soil Science. Vol V, 28-29 pp.**
- Sarkar, K.M.; Burns, R.G. 1984. Synthesis and properties of  $\beta$  D- $\beta$  Glucosidase-phenolic copolymers as analogues of soil humic enzymes complexes. Soil Biol. Biochem. 16:619-625.**
- Sarkar, J.M.; Leonowicz, A. ; Bollag, J.M. 1988. Immobilization of enzymes on clays and soils. Soil Biol. Biochem 21(2):223-230.**

- Sawhney, B.L. 1989. Movement of organic chemicals. En "Reactions and movement of organic chemicals in soils. SSSA. Special Publication Number 22. Soil Science Society of America Inc and American Society of Agronomy Inc. Madison Wisconsin, USA. pp 447-474.**
- Schnitzer, M. 1978. Humic substances. Chemistry and reactions. En M. Schnitzer y Khan, S.V. Eds. Soil Organic Matter. Elsevier. New York pp 1-64.**
- Schnitzer, M.; Ripmeester, A.J.; Kodoma, H. 1988. Characterisation of the organic matter associated with a soil clay. Soil Sci. 145(6):448-454.**
- Shindo, H.; Huang, P.M. 1984. Catalytic effects of manganese (IV), iron (III), aluminum and silicon oxides in the formation of phenolic polymers. Soil Sci Soc.J. 48: 927-934.**
- Schulze, D.G; Nagel, L.J.;Van Scoyoc, E.G.; Henderson, L.T.; Barngardner, F.M. 1993. Significance of organic matter in determining soil colors. En "Soil Color". SSSA Special Publication. Number 31. Soil Science Society of America. Inc. Madison Wisconsin, USA pp 71-90.**
- Shindo, H. ; Huang, P.M.1985. The catalytic power of inorganic components in the abiotic synthesis of hidroquinona-derived humic polymers. Appl.Clay Sci. 1:71-81.**
- Solomon, D.H.; Hawthorne, D.G. 1983. Chemistry of pigments and fillers, Wiley, N.Y. pp 1-309.**

- Sorensen, L.H. 1975. The influence of clay on the rate of decay of amino acid metabolites synthesized in soil during the decomposition of cellulose. Soil Biol Biochem. 7:171-176.**
- Sposito, G.; Page, A.L. 1984. Cycling of metal ions in the soil environment en H. Sigel. De; Metal Ions in biological systems: Vol 8. Circulation of metals in the environment, Marcel Dekker, N.Y. pp 287-232.**
- Stevenson, F.J. 1994. Humus Chemistry. Genesis, composition, reactions 2a. ed. John Wiley and Sons. New York 589 pp.**
- Stott, D.E.; Kassim, G.; Jarre, M.; Martin, W.M.; Haider, K.1983. Stabilization and incorporation into biomass of specific plant carbons during biodegradation in soil Plant Soil 70:15-26.**
- Stotzky, G. 1986. Influence of soil mineral colloids on metabolic processes, growth, adhesion, and ecology of microbes and viruses. En P.M. Huang and M. Schnitzer (ed). Interactions of soil minerals with natural organics and microbes, Spec Publ. No 17. Soil Science Society of America, Madison, Wis. pp 305-428.**
- Tamhane, R.V. ; Motiramani, D.P. 1986. Suelos: Su Química y Fertilidad en Zonas Tropicales. ED.Diana. México 483 pp.**
- Tan, K.H. 1986. Degradation of soil minerals by organic acids . En "Interactions of soil minerals with natural organics and microbes ". SSSA. Spec Pub. No. 17 pp 1-27.**



- Tate, K.B.; Theng, K.G. 1980. Organic matter and its interactions with inorganic soil constituents. En K.G. Theng (ed) .Soils with variable charge. New Zealand . Society of Soil Science Soils Bureau. Department of Science and Industrial Research Lower Hutl.**
- Theng, B.K. 1979. Formation and properties of clay polymer complexes. Elsevier Science Publishing. N.Y. pp 157-226.**
- Tisdale, N. 1987. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. UTEHA. México 78-120.**
- Tsutsuki, K.; Kuwatsuka, S. 1979. Chemical studies on soil humic acids. Soil Sci. Plant Nutr. 25: 29-38.**
- Tyler, G. 1981. Heavy metals in soil biology and biochemistry En . E.A. Paul y Ladd, J.N. Soil Biochemistry Marcel Dekker Inc. N.Y. Vol. 5 pp 371-414.**
- Van Faassen, H.G. 1973. Effect of mercury compounds on soil microbes. Plant Soil 38:485-487.**
- Vallejo, G.E. 1997. Grupo de las esmectitas o montmorillonitas. En Cordero Borboa (Eds) Apuntes del Curso de Cristalografía de Suelos. SMCr pp 127-147. Instituto de Física, UNAM. México.**
- Vallejo, G.E. 1997. Grupo de las illitas. En Cordero, B.A. (eds) Apuntes del Curso de Cristalografía de Suelos S.M.Cr. pp 149-165. México Instituto de Física UNAM.**

- Verna, L.; Martin, J.P.; Haider, K. 1975. Decomposition of carbon-14 labeled proteins, peptides, and aminoacid: free and complexed with humic polymers. *Soil Sci. Soc. Am.Proc.* 39:279-284.
- Wada, K; Aomine, S. 1973. Soil development on volcanic materials during the quaternary. *Soil Sci* .116:170-177.
- Walkley, A.L. 1947. A rapid determination of soil organic matter. *J.Agric.* 25:63-68.
- Wang, T.S; Li, S.W.; Ferg, Y.L. 1978. Catalytic polymerization of phenolic compounds by clay minerals. *Soil Sci* 126:15-21.
- Wang, T.S; Kao, M.M.; Huang, P.M. 1980. The effect of pH on the catalytic synthesis of humic substances by illite. *Soil Sci* 129: 333-338.
- Wang, T.S.; Wang, M.CH; Fering, Y.L.; Huang, P..M. 1983. Catalytic synthesis of humic substances by natural clays, silts and soils. *Soil Science* 135(6):350-360.
- Wang, T. S. Huang, P.M.; Chou C..H.; Chen J.H. 1986. The role of soil minerals in the abiotic polymerizaation of phenolic compounds and formation of humic substances. En P.M. Huang and Schnitzer. M. (ed) *Interaction of soil minerals with natural organics and microbes. Spec. Publ. No. 17. Soil Science Society of America, Madison, Wis. pp 251-281.*
- Werner, D. 1977. *The Biology of Diatoms. Botanical Monographs- Vol 13 Blackwell, Scientific publications. London. pp 110-149; 198-223.*
- White, J.L.; Roth, Ch, B. 1986. Infrared spectrometry. En Page A.L. *Methods of Soils analysis Part I. Physical and Mineralogical Methods Agronomy Monograph*

**No. 9. American Society of Agronomy. Soil Science Society of America. 2a. Edition pp 775-824.**

**Wild, A. 1988. Russell's Soil Conditions and Plant growth. 11th. Ed. Longman Scientific & Technical. Great Britain. 991 pp.**

**Zielke, R.C.; Pinnavaia, T.J.; Mortland, M.M. 1989. Adsorption and reactions of selected organic molecules on clay mineral surfaces. En Sawhney, B.L. & K. Brown (eds). Reactions and Movement of Organic Chemicals in Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Special publication No. 22. Madison Wisconsin, USA pp. 81-97.**