



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**POSGRADO EN CIENCIAS
BIOLÓGICAS**

FACULTAD DE CIENCIAS

**CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS,
SALINIDAD Y SODICIDAD EN SUELOS DE CHINAMPA
DE XOCHIMILCO, SAN LUÍS TLAXIALTEMALCO,
TLÁHUAC Y MÍXQUIC, D.F.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS (BIOLOGÍA)

P R E S E N T A

M. EN C. ROSALÍA RAMOS BELLO

DIRECTOR DE TESIS: DR. LENOM J. CAJUSTE

MÉXICO, D.F.

FEBRERO, 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

A mi hijo

Gilberto con todo mi amor, por su apoyo constante y cariño, le dedico este trabajo en el que espero le sirva de estímulo para su desarrollo académico y profesional.

A mis padres

Daniel y Rosa Ma por sus consejos que siempre me han brindado para la realización de este trabajo.

A mis hermanas

Vicky y Margarita con mucho cariño y afecto.

A mi hermano

Arturito †, por su interés y admiración en mi desempeño académico y que donde quiera que se encuentre haga brillar la luz del amor y esperanza.

A mis sobrinos

Paco, Luz Adriana, Luís Héctor y Yazmín, para que se motiven en su desempeño académico y logren conseguir lo que se propongan.

También a Francisco Javier y Luís Héctor, por su apoyo y cariño.

A mi abuelita

Manuelita †, por su entusiasmo y cariño durante los últimos años de su vida.

A mis tíos, primos y amigos.

Y especialmente a **Dios**.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Lenom J. Cajuste por la dirección de éste trabajo.

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar por sus sugerencias y revisión exhaustiva del presente trabajo. A la Dra. Norma E. García Calderón por sus comentarios y sugerencias. Al Dr. David Flores Román por su paciencia en la revisión de dicho trabajo.

Del mismo modo agradezco a los demás miembros del Jurado: José López García, Dra. Amada Laura Reyes Ortigoza y Dra. Teresa de Jesús Reyna Trujillo, por sus valiosas sugerencias y aportaciones en el presente trabajo.

Así mismo, deseo hacer patente mi agradecimiento a la Dra. Corina Solís y al Dr. Eduardo Andrade, por las facilidades brindadas en el uso del Acelerador Van de Graaff de 5.5 MV del IFUNAM y del Proyecto DGAPA IN108798. Del mismo modo al M. en C. E.P. Zavala del mismo Instituto por la asistencia en las muestras de suelos. Al Dr. Miguel Ortiz Olguín de la UACH, por sus valiosas sugerencias y comentarios. Al Ing. Agron. Ivan Andrade Luna, así como Ivan Reyes Solís, por su apoyo brindado en la realización de este trabajo.

A la Biól. Elizabeth Fuentes R. por su ayuda y sugerencias atinadas en la elaboración del presente trabajo.

A la Auxiliar de laboratorio Consuelo González Cano, por su apoyo en el manejo de muestras. Al M. en C. Jaime Cruz del Colegio de Postgraduados, por su apoyo en el trabajo de laboratorio.

Al Arquitecto Porfirio Munguía del Taller de Dibujo y al Sr. Jesús Saenz Zea de la Coordinación de Servicios Generales. A Ma de los Angeles Leonel Gómez por el apoyo de mecanografía. Al Dr. Adolfo Andrade encargado del invernadero de la Facultad de Ciencias.

En especial agradezco a mi Maestro Nicolás Aguilera Herrera , por guiarme e iniciar el camino de la investigación en Edafología.

También a mis compañeros y amigos que de una u otra forma colaboraron en la realización de este trabajo.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	xv
SUMARY	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1 ORIGEN DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO	3
1.1. HISTORIA DE LA ZONA CHINAMPERA	4
1.1.1. Construcción y distribución de la chinampa	5
1.1.2. Diversificación de la producción	5
1.1.3. Características Botánicas y Taxonómicas de <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>	8
a. Requerimientos de clima	8
b. Requerimientos de suelo y fertilización	8
c. Prácticas de cultivo	9
d. Plagas y enfermedades	9
e. Cosecha	9
1.2. CONTAMINACIÓN Y DESECACIÓN DE LAS CHINAMPAS	10
1.2.1. Aumento de la salinidad en el suelo	10
1.2.2. La erosión del suelo	10
1.2.3. Las plagas en el sistema chinampero	11
1.2.4. Abandono de prácticas adecuadas	11
1.3. RESCATE DE LAS CHINAMPAS	11
1.3.1. Planta de tratamiento de agua residual del Cerro de la Estrella	11
1.3.2. Uso del agua residual tratada	12
CAPITULO 2 SUELOS AFECTADOS POR SALES EN EL MUNDO	13
2.1. SUELOS SALINOS Y SÓDICOS EN MÉXICO	13
2.2. ORIGEN DE LA SALINIDAD	13
2.2.1. Salinización primaria	14
2.2.2. Salinización secundaria y sus causas	15

2.3.	MECANISMO DE TRANSPORTE DE LAS SALES	15
2.3.1.	Principales tipos de sales en suelos y aguas	16
	a) Cloruros	17
	b) Sulfatos	18
	c) Carbonatos y bicarbonatos de sodio	18
	d) Nitratos	19
2.4.	CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES Y SODIO	19
2.4.1.	Suelos salinos	19
2.4.2.	Suelos sódicos no salinos	20
2.4.3.	Suelos sódicos-salinos	22
2.5.	EFFECTO DE LA SALINIDAD SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO	22
2.6.	EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE SALES SOLUBLES DEL SUELO SOBRE LOS CULTIVOS	23
2.6.1.	Reacción de las plantas a las sales solubles del suelo	24
2.6.2.	Formas de adaptación de las halófitas a las sales	24
2.6.3.	Efecto de las sales sobre la germinación	25
2.6.4.	Efecto de las sales sobre la absorción de nutrientes	25
2.6.5.	Tolerancia relativa de los cultivos a las sales y elementos tóxicos	25
2.6.6.	Tolerancia de los cultivos a elementos tóxicos y sodio intercambiable	26
	a) Cloruros	26
	b) Sodio intercambiable	26
2.6.7.	Mecanismo mediante los cuales las plantas toleran altas concentraciones de sales	27
CAPITULO 3	CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR ELEMENTOS TÓXICOS	28
3.1.	CONTAMINACIÓN POR ELEMENTOS TRAZA	28
3.1.1.	Distribución de los elementos traza a partir de la solución del suelo	29
3.1.2.	Riesgos derivados de la contaminación	30
3.1.3.	Definición y distribución y fuente de metales pesados	31

3.1.3.1.	Movilidad de los metales a través del perfil del suelo	31
3.1.3.2.	Formación de complejos metálicos en el suelo	32
3.1.4.	Factores físicos y químicos que afectan la retención de metales pesados	33
3.1.4.1.	pH	33
3.1.4.2.	Materia orgánica	33
3.1.4.3.	Textura	34
3.1.4.4.	Capacidad de intercambio catiónico	35
3.2.	INFLUENCIA DE LOS METALES PESADOS EN EL DESARROLLO DE LOS VEGETALES	35
3.2.1.	Absorción	36
3.2.1.1.	Absorción por raíz	37
3.2.1.2.	Absorción foliar	37
3.2.2.	Biodisponibilidad	38
3.3.	FORMAS EN EL SUELO, EN LA PLANTA Y FUNCIONES DE LOS METALES TRAZA Y METALES PESADOS	38
3.3.1.	Fierro	38
3.3.1.1.	Formas en el suelo	38
3.3.1.2.	Formas y funciones en la planta	39
3.3.2.	Cobre	40
3.3.2.1.	Formas en el suelo	40
3.3.2.2.	Formas y funciones en la planta	41
3.3.3.	Manganeso	42
3.3.3.1.	Formas en el suelo	42
3.3.3.2.	Formas y funciones en la planta	43
3.3.4.	Zinc	43
3.3.4.1.	Formas en el suelo	43
3.3.4.2.	Formas y funciones en la planta	44
3.3.5.	Plomo	45
3.3.5.1.	Formas en el suelo	45
3.3.5.2.	Formas y funciones en la planta	4

3.3.6.	Níquel	47
3.3.6.1.	Formas en el suelo	47
3.3.6.2.	Formas y funciones en la planta	48
3.3.7.	Cromo	49
3.3.7.1.	Formas en el suelo	49
3.3.7.2.	Formas y funciones en la planta	50
3.3.8.	Cadmio	50
3.3.8.1.	Formas en el suelo	50
3.3.8.2.	Formas y funciones en la planta	51
CAPITULO 4	OBJETIVOS	53
4.1.	OBJETIVOS GENERALES	53
4.2.	OBJETIVOS PARTICULARES	53
4.3.	HIPÓTESIS	54
CAPITULO 5	DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES DE LAS ZONAS DE ESTUDIO	55
5.1.	DELEGACIÓN DE XOCHIMILCO, D.F.	55
5.1.1.	Localización	55
5.1.1.1.	San Luís Tlaxialtemalco	55
5.2.	DELEGACIÓN DE TLÁHUAC, D.F.	56
5.2.1.	Localización	56
5.2.1.1.	San Andrés Mixquic	57
5.2.2.	Geología	57
5.2.3.	Fisiografía	57
5.2.4.	Hidrología	58
5.2.5.	Clima	59
5.2.6.	Vegetación	60
5.2.7.	Suelos	61
CAPITULO 6	MATERIALES Y MÉTODOS	63
6.1.	DE CAMPO	63
6.2.	DE LABORATORIO	66
6.2.1.	Propiedades Físicas	66
6.2.2.	Propiedades Químicas	66

	6.2.2.1. Metales extractables en suelos	67
	6.2.2.2. Metales totales en suelos	67
	6.3. DE INVERNADERO	67
	6.3.1. Niveles de concentración de composta, plomo y níquel aplicados al suelo de invernadero	69
	6.3.2. Colecta y análisis del material vegetal	69
	6.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	71
CAPITULO 7	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
	7.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS PERFILES DE SUELOS DE CHINAMPAS	72
	7.1.1. Xochimilco	72
	7.1.2. San Luís Tlaxialtemalco	81
	7.1.3. Tláhuac	94
	7.1.4. Míxquic	106
	7.1.5. Discusión de las propiedades físicas y químicas de los suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Míxquic, D.F.	115
	7.2. METALES TRAZA Y METALES PESADOS EXTRACTABLES (DTPA) EN SUELOS DE CHINAMPAS	126
	7.2.1. Xochimilco	126
	7.2.2. San Luís Tlaxialtemalco	127
	7.2.3. Tláhuac	129
	7.2.4. Míxquic	130
	7.3. METALES TRAZA Y METALES PESADOS TOTALES (PIXE) EN SUELOS DE CHINAMPAS	132
	7.3.1. Xochimilco	132
	7.3.2. San Luís Tlaxialtemalco	133
	7.3.3. Tláhuac	136
	7.3.4. Míxquic	137
	7.3.5. Discusión de los metales traza y metales pesados extractables y totales en suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Míxquic, D.F.	139

7.4. ANÁLISIS DEL MATERIAL VEGETAL (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>)	144
7.4.1. Biomasa total, peso seco del follaje, peso seco de la raíz, longitud total, ancho y número de hojas en acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>) desarrollada en invernadero	144
7.4.2 Metales traza y metales pesados en acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>) desarrollada en invernadero	148
7.4.3. Discusión del análisis del material vegetal (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>)	153
7.5. METALES TRAZA Y METALES PESADOS EXTRACTABLES (DTPA) EN EL SUELO DE INVERNADERO ANTES DE LA SIEMBRA DE <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>	156
7.6 METALES TRAZA Y METALES PESADOS EXTRACTABLES (DTPA) EN EL SUELO DE INVERNADERO DESPUÉS DE LA COSECHA DE <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>	161
7.6.1. Discusión de los metales traza y metales pesados extractables (DTPA) antes de la siembra y después de la cosecha de <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>	166
7.7. METALES TRAZA Y METALES PESADOS TOTALES (PIXE) EN EL SUELO DE INVERNADERO ANTES DE LA SIEMBRA DE <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>	166
7.8. METALES TRAZA Y METALES PESADOS TOTALES (PIXE) EN EL SUELO DE INVERNADERO DESPUÉS DE LA COSECHA DE <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>	171
7.8.1. Discusión de los metales traza y metales pesados totales (PIXE) antes de la siembra y después de la cosecha de <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>	176
CAPITULO 8 CONCLUSIONES	178
CAPITULO 9 LITERATURA CITADA	180
APÉNDICE A	192
APÉNDICE B	202
APÉNDICE C	208
APÉNDICE D	215

INDICE DE CUADROS

			Página
Cuadro	3.1.	Constitución química de algunos minerales primarios del suelo.	29
Cuadro	6.1.	Concentraciones de $Pb(NO_3)_2$, $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ y compota de <i>Casuarina equisetifolia</i> L. empleadas en el diseño experimental de invernadero.	70
Cuadro	7.1.	Propiedades físicas y químicas del P-1 Xochimilco, D.F.	73
Cuadro	7.2.	Composición iónica del extracto de saturación del P-1 Xochimilco, D.F.	75
Cuadro	7.3.	Propiedades físicas y químicas del P-2 Xochimilco, D.F.	77
Cuadro	7.4.	Composición iónica del extracto de saturación del P-2 Xochimilco, D.F.	79
Cuadro	7.5.	Propiedades físicas y químicas del P-3 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	82
Cuadro	7.6.	Composición iónica del extracto de saturación del P-3 San Luis Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	84
Cuadro	7.7.	Propiedades físicas y químicas del P-4 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	86
Cuadro	7.8.	Composición Iónica del extracto de saturación del P-4 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	88
Cuadro	7.9.	Propiedades físicas y químicas del P-5 San Luís Tlaxialtemalco Xoch. D.F.	91
Cuadro	7.10.	Composición iónica del extracto de saturación del P-5 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	93
Cuadro	7.11.	Propiedades físicas y químicas del P-6 Tláhuac D.F.	95
Cuadro	7.12.	Composición iónica del extracto de saturación del P-6 Tláhuac, D.F.	97
Cuadro	7.13.	Propiedades físicas y químicas del P-7 Tláhuac D.F.	98
Cuadro	7.14.	Composición iónica del extracto de saturación del P-7 Tláhuac, D.F.	100
Cuadro	7.15.	Propiedades físicas y químicas del P-8 Tláhuac, D.F.	103
Cuadro	7.16.	Composición iónica del extracto de saturación del P-8 Tláhuac, D.F.	105
Cuadro	7.17.	Propiedades físicas y químicas del P-9 Mixquic, D.F.	107
Cuadro	7.18.	Composición iónica del extracto de saturación P-9 Mixquic, D.F.	109
Cuadro	7.19.	Propiedades físicas y químicas del P-10 Mixquic, D.F.	111
Cuadro	7.20.	Composición iónica del extracto de saturación del P-10 Mixquic, D.F.	113
Cuadro	7.21.	Contenido de metales traza y metales pesados extractables (DTPA) en los suelos de chinampa.	128

Cuadro 7.22.	Contenido de metales traza y metales pesados extractables en mg kg ⁻¹ reportados por diferentes autores y sitios de muestreo.	131
Cuadro 7.23.	Contenido de metales traza y metales pesados totales (PIXE) en los suelos de chinampa.	135
Cuadro 7.24.	Contenido de metales traza y metales pesados totales en mg kg ⁻¹ reportados por diferentes autores y sitios de muestreo.	138
Cuadro 7.25.	Rendimiento en biomasa total, longitud total, ancho y número de hojas en acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>) desarrollada en invernadero.	145
Cuadro 7.26.	Contenido de metales traza y metales pesados en acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>) desarrollada en invernadero.	149
Cuadro 7.27.	Contenido de metales traza y metales pesados extractables (DTPA) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	157
Cuadro 7.28.	Contenido de metales traza y metales pesados extractables (DTPA) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	162
Cuadro 7.29.	Contenido de metales traza y metales pesados totales (PIXE) en el suelo de Invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	167
Cuadro 7.30.	Contenido de metales traza y metales pesados totales (PIXE) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	172
Cuadro A1.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-1 Xochimilco, D.F.	193
Cuadro A2.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-2 Xochimilco, D.F.	193
Cuadro A3.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-3 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	194
Cuadro A4.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-4 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	194
Cuadro A5.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-5 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	195
Cuadro A6.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-6 Tláhuac, D.F.	195

Cuadro A7.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-7 Tláhuac, D.F.	196
Cuadro A8.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-8 Tláhuac, D.F.	196
Cuadro A9.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-9 Mixquic, D.F.	197
Cuadro A10.	Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-10 Mixquic, D.F.	197
Cuadro A11.	Matriz de correlaciones de metales extractables (DTPA) Xochimilco, D.F.	198
Cuadro A12.	Matriz de correlaciones de metales extractables (DTPA) San Luís Tlaxialtemalco, Xoch., D.F.	198
Cuadro A13.	Matriz de correlaciones de metales extractables (DTPA) Tláhuac, D.F.	199
Cuadro A14.	Matriz de correlaciones de metales extractables (DTPA) Mixquic, D.F.	199
Cuadro A15.	Matriz de correlaciones de metales totales (PIXE) Xochimilco, D.F.	200
Cuadro A16.	Matriz de correlaciones de metales totales (PIXE) San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	200
Cuadro A17.	Matriz de correlaciones de metales totales (PIXE) Tláhuac, D.F.	201
Cuadro A18.	Matriz de correlaciones de metales totales (PIXE) Mixquic, D.F.	201
Cuadro B1.	Contenido de sales solubles del P-1 Xochimilco, D.F.	203
Cuadro B2.	Contenido de sales solubles del P-2 Xochimilco, D.F.	203
Cuadro B3.	Contenido de sales solubles del P-3 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	204
Cuadro B4.	Contenido de sales solubles del P-4 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	204
Cuadro B5.	Contenido de sales solubles del P-5 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.	205
Cuadro B6.	Contenido de sales solubles del P-6 Tláhuac, D.F.	205
Cuadro B7.	Contenido de sales solubles del P-7 Tláhuac, D.F.	206
Cuadro B8.	Contenido de sales solubles del P-8 Tláhuac, D.F.	206
Cuadro B9.	Contenido de sales solubles del P-9 Mixquic, D.F.	207
Cuadro B10.	Contenido de sales solubles del P-10 Mixquic, D.F.	207
Cuadro C1.	Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de biomasa total, peso seco en follaje y raíz, longitud de la planta, ancho de la hoja y número de hojas en acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	209

Cuadro C2.	Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de metales traza y metales pesados en acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	210
Cuadro C3.	Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de metales traza y metales pesados extractables (DTPA) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	211
Cuadro C4.	Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de metales traza y metales pesados extractables (DTPA) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	212
Cuadro C5.	Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de metales traza y metales pesados totales (PIXE) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	213
Cuadro C6.	Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de metales traza y metales pesados totales (PIXE) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	214
Cuadro D1.	Contenido de metales traza extractables (DTPA).	216
Cuadro D2.	Concentración de metales traza y metales pesados totales en suelos en mg kg ⁻¹ .	216
Cuadro D3.	Concentración de metales traza y metales pesados en tejido vegetal en mg kg ⁻¹ .	216
Cuadro D4.	Contenido de metales traza y metales pesados en tejido vegetal en mg kg ⁻¹ .	217
Cuadro D5.	Contenido de metales traza y metales pesados en tejido vegetal en mg kg ⁻¹ .	217
Cuadro D6.	Propiedades químicas de los metales traza y metales pesados.	218

INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1.	Diagrama de una chinampa tradicional construida con capas de hierba acuática, abono y tierra. Ahuejote plantado a lo largo y orilla de la chinampa.	4
Figura 1.2.	Chinampero extrayendo el lodo del fondo de los canales para la construcción de chapines.	7
Figura 1.3.	Vista panorámica de una chinampa rodeada <i>Salix bomplandiana</i> Kunth y cultivada con <i>Mathiola incana</i> L. en Xochimilco, D.F.	7
Figura 2.1.	Vista panorámica de una chinampa afectada por la salinidad. Nótese el deficiente desarrollo de los cultivos en Tláhuac, D.F.	16
Figura 2.2.	Vista de una canal desarrollándose una gran cantidad de <i>Eichornia crassipes</i> (Martius) Solm, evitando el paso de la lancha. Xochimilco, D.F.	16
Figura 5.1.	Mapa de localización de las zonas de estudio.	56
Figura 6.1.	Mapa de ubicación de los sitios de muestreo en Xochimilco, San Luis Tlaxiátemalco, Tláhuac y Míxquic, D.F.	65
Figura 6.2.	Desarrollo de la acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>) a los 35 días después de la siembra.	68
Figura 6.3.	Desarrollo de la acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>) con los tratamientos 1 (0-0-0) y 13 (30-500-0).	68
Figura 7.1	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), textura. En el perfil edafológico número 1, Xochimilco, D.F.	74
Figura 7.2	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), textura. En el perfil edafológico 2, Xochimilco, D.F.	78
Figura 7.3.	Vista morfológica del P-1, localizado en Tecaltitla, Xochimilco, D.F. No hay diferenciación de horizontes.	80
Figura 7.4.	Vista morfológica del P-2, localizado en el canal de Apatlaco, Xochimilco, D.F. Profundidad de 120 cm.	80

Figura 7.5	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), textura. En el perfil edafológico número 3, San Luís Tlaxialtemalco, Xochimilco, D.F.	83
Figura 7.6	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), Textura. En el perfil edafológico número 4, San Luís Tlaxialtemalco, Xochimilco, D.F.	87
Figura 7.7	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), textura. En el perfil edafológico número 5, San Luís Tlaxialtemalco, Xochimilco, D.F.	92
Figura 7.8	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), textura. En el perfil edafológico número 6, Tláhuac, D.F.	96
Figura 7.9	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), textura. En el perfil edafológico número 7, Tláhuac, D.F.	99
Figura 7.10.	Vista morfológica del P-7 localizado en Tláhuac, D.F. Nótese las costras blancas en la capa superficial.	101
Figura 7.11.	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), textura. En el perfil edafológico número 8, Tláhuac, D.F.	104
Figura 7.12.	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), textura. En el perfil edafológico número 9, Tláhuac, D.F.	108
Figura 7.13.	Distribución del pH, conductividad eléctrica (CE mS·cm ⁻¹), iones (mmol _c ·L ⁻¹), sólidos totales (mg·L ⁻¹), porcentaje de sodio intercambiable (PSI), humedad (θ), materia orgánica (M.O.), textura. En el perfil edafológico número 10, Míxquic, D.F.	112

Figura 7.14.	Vista morfológica del P-10 localizado en Mixquic, D.F. Se puede observar una gran cantidad de raíces.	114
Figura 7.15.	Relación de conductividad eléctrica y concentración de sólidos totales en los perfiles de suelo de chinampas de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.	119
Figura 7.16.	Relación de conductividad eléctrica y concentración de cationes de los perfiles de suelo de chinampas de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.	120
Figura 7.17.	Relación de conductividad eléctrica y concentración de aniones en los perfiles de suelo de chinampas de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.	121
Figura 7.18.	Distribución de los tipos de sales de los suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.	122
Figura 7.19.	Espectro de emisión de Rayos X (PIXE) producido por el bombardeo de protones de 2 MeV a las muestras de suelo.	137
Figura 7.20.	Rendimiento en biomasa total, peso seco de follaje y raíz, longitud total, ancho de la hoja y número de hojas en <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i> desarrollada en el invernadero.	146
Figura 7.21.	Vista panorámica del desarrollo de <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i> a los 57 días de la siembra.	147
Figura 7.22.	Comparación de los tratamientos 1 (0-0-0) y 4 (0-500-0) a los 70 días de la siembra.	148
Figura 7.23.	Contenido de fierro, cobre, manganeso y zinc en acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>) desarrollada en invernadero.	150
Figura 7.24.	Contenido de plomo, níquel, cromo y cadmio en acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>) desarrollada en invernadero.	150
Figura 7.25.	Comparación de los tratamientos 1 (0-0-0) y 18 (30-1000-1000) de <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i> a los 70 días de la siembra.	151
Figura 7.26.	Desarrollo de la raíz y follaje de <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i> a los 70 días de la siembra, con el tratamiento 18 (30-1000-1000).	151
Figura 7.27.	Desarrollo de la raíz y follaje de <i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i> a los 70 días de la siembra, con el tratamiento 7 (0-1000-0).	153

Figura 7.28.	Contenido de hierro, cobre, manganeso y zinc extractables (DTPA) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	158
Figura 7.29.	Contenido de plomo y níquel, extractables (DTPA) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	158
Figura 7.30.	Contenido de metales de cromo y cadmio extractables (DTPA) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	159
Figura 7.31.	Contenido de hierro, cobre, manganeso y zinc extractables (DTPA) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	163
Figura 7.32.	Contenido de plomo y níquel extractables (DTPA) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	163
Figura 7.33.	Contenido de cromo y cadmio extractables (DTPA) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	164
Figura 7.34.	Contenido de hierro total (PIXE) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	168
Figura 7.35.	Contenido de cobre, manganeso y zinc total (PIXE) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	168
Figura 7.36.	Contenido de plomo y níquel total (PIXE) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	169
Figura 7.37.	Contenido de cromo y cadmio total (PIXE) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	169
Figura 7.38.	Contenido de hierro total (PIXE) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	173
Figura 7.39.	Contenido de cobre, manganeso y zinc total (PIXE) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	173
Figura 7.40.	Contenido de plomo y níquel total (PIXE) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	174
Figura 7.41.	Contenido de cromo y cadmio total (PIXE) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i>).	174

INTRODUCCIÓN

El sistema agrícola más intensivo, en términos de producción anual por unidad de área y con mayor biodiversidad es el agroecosistema chinampero. Actualmente, se pretende aprovechar desde el punto de vista productivo para lo cual se han desarrollado cultivos que permiten alcanzar dicho fin, entre los que se encuentran la horticultura y la floricultura.

La base de esta agricultura es la abundancia de agua que se maneja en forma muy eficiente mediante canales construidos artificialmente. En estos canales se produce buena parte de la materia orgánica utilizada para el abonamiento de la chinampa.

La producción de plantas, tanto para el consumo local como para su venta al exterior es amplia y fundamentalmente consiste de hortalizas, acelgas, verdolagas, cilantro, lechuga, coliflor, rábanos, zanahorias, brócoli, calabazas y flores como pincel, cempazuchitl, mercadela, clavel, rosa y nardo.

En la zona existen también cultivos arbóreos, como los sauces, que dan la fisonomía característica chinampera y que se utilizan tanto en sombra como material maderable. Las chinampas se encuentran en peligro de desaparecer debido al crecimiento urbano de la Ciudad de México y a la sobreexplotación de los mantos acuíferos de esta región.

En la gran zona chinampera de Ixtacalco, Iztapalapa, Mexicalcingo y Culhuacán, ya no queda nada, además está todo cubierto con construcciones urbanas o bien es el lecho desecado del lago.

El Gobierno de la Ciudad de México promovió el tratamiento de aguas negras emitidas por la población de la Ciudad de México y su recanalización al área de Xochimilco. La introducción de esta agua tratada alteró el sistema y originó la extinción de la mayoría de las especies vegetales autóctonas de los canales y las chinampas.

Desde la introducción de aguas negras parcialmente tratadas a partir de 1957, el problema de ensalitramiento ha empeorado sustituyéndose los cultivos de hortalizas y de especies tradicionales por cultivos en macetas de plantas de ornato y finalmente ocurre su abandono.

En el sistema de *chinampas* se ha llevado a cabo cambios ecológicos drásticos provocados por agentes externos al sistema como es la contaminación salino-sódica, metales pesados y fosfatos originados por los detergentes.

El agua aún después del tratamiento secundario en la planta Cerro de la Estrella contiene en promedio (anual) 0.069 y 0.056 mg L⁻¹ de Pb y Cr totales; 75.72 mg·L⁻¹ de Na⁺, 165.96 mg·L⁻¹ de HCO₃⁻ y 57.16 mg L⁻¹ de Cl⁻ (DGCOH, 2000); en los 149.8 m³ d⁻¹ liberados a los canales que circundan a la zona chinampera (DGCOH, 2001).

El efecto de los metales pesados sobre la calidad del ambiente ha sido un aspecto importante en la investigación de las últimas décadas (Cajuste *et al.*, 1991; Carrillo *et al.*, 1992; Cajuste y Laird, 2000). Las aguas negras utilizadas para el riego, los lodos residuales, subproducto de las plantas de tratamiento de aguas residuales utilizados como fertilizantes o mejoradores del suelo así como las impurezas de

fertilizantes inorgánicos, son causa de la contaminación por metales pesados en los suelos y en las plantas (Gutiérrez *et al.*, 1995).

Gran cantidad de estudios han avalado que los metales pesados originan múltiples efectos tóxicos en las plantas cultivadas, los cuales están relacionados prácticamente con todas sus funciones fisiológicas; interfiriendo en las actividades enzimáticas, en la fotosíntesis, respiración, nutrición mineral, balance hídrico, funciones de las membranas, balance hormonal e inducción de alteraciones a nivel de cromosomas, entre otros (Díaz, 1999).

La movilidad de los iones en el suelo, incluyendo la de los metales pesados, depende de la saturación de agua, la velocidad de desplazamiento del agua en el suelo, el potencial redox, el pH, la interacción con otros constituyentes de la solución y propiedades del suelo, la cantidad y calidad de los sitios de adsorción, la concentración y tipo de complejos orgánicos e inorgánicos, la composición catiónica y aniónica del suelo, conductividad hidráulica y actividad microbiana, (Colombo *et al.*, 1998). Todas estas variables, pueden cambiar en distancias cortas y, por lo tanto, la concentración de metales está sujeta a variabilidad espacial y temporal (Petruzzelli *et al.*, 1978; Piccolo y Celano, 1992; Petrovic *et al.*, 1999).

Con base en lo anteriormente expuesto, sobre la importancia de la salinidad, y contenido de los metales pesados en los suelos, el presente estudio tiene como principal finalidad cuantificar estos niveles de contaminación en los suelos y evaluar el efecto tóxico de los metales traza Fe, Cu Mn y Zn y metales pesados Pb Ni Cr y Cd. De igual forma conocer los niveles de captación de estos metales en la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) al aplicar Pb y Ni en forma de $Pb(NO_3)_2$ y $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ en macetas desarrollada en el invernadero.

RESUMEN

La región chinampera de Xochimilco, Tláhuac y Mixquic presenta un deterioro ambiental severo, y en peligro de desaparecer debido al crecimiento urbano, a la sobreexplotación de los mantos acuíferos, originando una contaminación física, química y biológica.

Los objetivos planteados en este trabajo consistieron en 1) Determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos de chinampa; 2) Conocer los niveles de salinidad, sodicidad, metales traza y metales pesados extractables y totales en los suelos; 3) Establecer las correlaciones entre las propiedades físicas y químicas y niveles de contaminantes; 4) Determinar la concentración de metales traza y metales pesados en la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) al aplicar Pb y Ni en forma de $Pb(NO_3)_2$ y $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ respectivamente y composta de *Casuarina equisetifolia* L., en los suelos, en un diseño experimental de invernadero; 5) Conocer la biomasa total, peso seco en follaje y raíz, longitud total, ancho de la hoja y número de hojas en la acelga; 6) Conocer la concentración de metales traza y metales pesados extractables y totales en los suelos tratados en invernadero antes de la siembra y después de la cosecha de la acelga.

Las propiedades físicas y químicas de los suelos se determinaron por los métodos analíticos convencionales (Klute, 1986; Bartels, 1996). Los metales traza y pesados extractables se extrajeron con DTPA-TEA- $CaCl_2$ (Lindsay y Norvell, 1978). Los metales traza y pesados totales se cuantificaron mediante la técnica de origen nuclear (PIXE) (particle induced X-ray emission). Para el trabajo de invernadero se estableció un diseño trifactorial con 18 tratamientos de arreglo combinatorio con una distribución en bloques al azar con 4 repeticiones. Las dosis empleados para *Casuarina equisetifolia* L. fueron: 0 y 30 $mg\ kg^{-1}$, Pb y Ni: 0, 500 y 1000 $mg\ kg^{-1}$.

Los suelos se clasifican por su origen antrópico como Antrosoles Téricos con base al sistema WRB, (1999). Las propiedades físicas y químicas de los suelos de chinampa se estudiaron en 10 perfiles de suelos, que variaron cada uno en profundidad desde 1.00 hasta 2.00 m; siendo la principal limitación su elevada salinidad y alcalinidad. Los suelos presentaron un pH alcalino y son ligeramente sódicos-salinos en las capas superficiales, ácidos en las capas más profundas con altos contenidos de materia orgánica. La CIC y Ca^{2+} intercambiable son superiores a 60 y 90 $cmol(+)kg^{-1}$ respectivamente. El Na^+ y SO_4^{2-} son los iones dominantes. El orden de distribución de los tipos de sales en los 4 sitios estudiados, presentaron la siguiente secuencia: $MgSO_4 > NaCl > Na_2CO_3 > NaHCO_3 > CaSO_4 > Na_2SO_4$ y en menor concentración: $Mg(HCO_3)_2$, $MgCl_2$ y $CaCl_2$ por lo tanto el tipo de salinidad en los 10 perfiles es sódica-clorhídrica-sulfática.

La mayor proporción de metales traza y metales pesados extractables y totales en éstos suelos se encuentran en forma adsorbida y fijada en el suelo, lo cual se debe a los pH alcalinos provocando que se precipiten como hidróxidos, carbonatos, sulfatos o fosfatos. El alto contenido de materia orgánica en estos suelos favorece la formación de complejos poco disponibles, disminuyendo la asimilación de los metales pesados por las raíces de las plantas. Los metales traza y metales pesados tienden a acumularse en la capa superficial. Los metales traza y metales pesados extractables (DTPA-TEA-CaCl₂) en los 10 perfiles de suelos tuvieron la siguiente secuencia: Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Pb>Cr>Cd. Se observó que el Fe²⁺ en el sitio 1>sitio 4>sitio 3>sitio 2; para Cu²⁺ y Mn²⁺ el sitio 4>sitio 2>sitio 1>sitio 3; para el Zn²⁺ el sitio 4>sitio 1>sitio 2>sitio 3; para el Pb²⁺ el sitio 1>sitio 4>sitio 2>sitio 3; para el Ni²⁺ el sitio 1>sitio 3>sitio 2>sitio 4 y finalmente para Cr³⁺ y Cd²⁺ el sitio 2>sitio 4>sitio 1>sitio 3.

Los metales traza y metales pesados totales (PIXE) tuvieron la siguiente secuencia: Fe>Cd>>Mn>Zn>Cr>Ni>Cu>Pb. Para el Fe el sitio 1>sitio 2>sitio 3>sitio 4; para el Cu y Mn el sitio 4>sitio 3>sitio 2>sitio 1; para el Zn el sitio 4>sitio 2>sitio 3>sitio 1; para el Pb el sitio 4>sitio 3>sitio 1>sitio 2; para el Ni el sitio 4>sitio 1>sitio 2>sitio 3; para el Cr el sitio 4>sitio 3>sitio 2>sitio 1; para el Cd el sitio 1>sitio 3>sitio 4>sitio 2.

La aplicación de Pb aparentemente no originó toxicidad. Los tratamientos 10 (30-0-0) y 16 (30-1000-0) al 18 (30-1000-1000) dieron una máxima respuesta en el desarrollo de la acelga. Esta puede estar relacionada directamente al efecto con el ión NO₃ que al del Pb. El efecto contrario se presentó cuando se aplicó el Ni. Los tratamientos 1 (0-0-0), 2 (0-0-500) y 4 (0-500-0) provocaron un bajo desarrollo. Las concentraciones de metales traza y metales pesados contenidos en el follaje de la acelga tuvieron la siguiente secuencia: Fe>Zn>Mn>Ni>Cu>Pb>Cr>Cd.

Los metales traza y metales pesados extractables (DTPA-TEA-CaCl₂) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga tuvieron la siguiente secuencia: Pb>Ni>Fe>Mn>Zn>Cu>Cd>Cr; y después de la cosecha fue: Pb>Ni>Fe>Mn>Zn>Cu>Cr>Cd. Las concentraciones de los metales traza y metales pesados disminuyeron después de la cosecha, debido a que fueron captados por la planta.

Los metales traza y metales pesados totales (PIXE) en el suelo de invernadero antes de la siembra de la acelga tuvieron la siguiente secuencia: Fe>Ni>Cd>Pb>Mn>Cr>Cu>Zn; y después de la cosecha: Fe>Ni>Mn>Pb>Cr>Zn>Cd>Cu.

SUMMARY

The chinampa zone in Xochimilco, Tlahuac and Mixquic presents a severe environmental degradation, and is in danger of disappearing due to urban growth and overexploitation of aquifer mantles with the consequence of physical, chemical and biological pollution.

The objectives of this study were 1) To examine the physical and chemical properties of chinampa soils; 2) To determine the level of pollution from salinity, sodicity, extractable and total trace and heavy metals in the soils; 3) To establish the relationships between physical and chemical properties of the soils and the concentration of pollutants; 4) To determine the trace and heavy metals accumulation in beet (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) grown (in a greenhouse) in soil supplemented with Pb and Ni as $Pb(NO_3)_2$ and $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ respectively and compost from *Casuarina equisetifolia* L., 5) To determine total biomass, dry weight, total length, width and number of leaves in beet grown as previously described; 6) To determine the concentration of extractable and total trace and heavy metals before planting and after harvesting the beets.

The physical and chemical properties of chinampa were characterized by conventional analytical methods (Klute, 1986; Bartels, 1996). The extractable trace and heavy metals were assessed with DTPA-TEA- $CaCl_2$ extraction method (Lindsay and Norvell, 1978). The total trace and heavy metals in soils were determined by Particle Induced X-Ray Emission (PIXE). For the greenhouse study a trifactorial design with 18 treatments with combining arrangement, was applied in a random block distribution with 4 repetitions. The doses used for *Casuarina equisetifolia* L. were compost: 0 and 30 mg kg^{-1} ; Pb and Ni: 0, 500 and 1000 mg kg^{-1} .

Chinampa soils are classified by their antropic origin as Anthrosols Terric based on the WRB system (1999). The physical and chemical properties of chinampa soils were studied in 10 soil profiles, which varied in depth from 1.00 to 2.00 m. They were characterized by a high salinity and alkalinity. They have an alkaline pH and are slightly sodic-saline in the upper layers, but acid in deeper layers, with high contents of organic matter. CEC and Ca^{2+} ions are above 60 and 90 $cmol(+)kg^{-1}$ respectively. Na^+ and SO_4^{2-} are the dominant ions. The distribution order of salt types in all 4 sites studied showed the following sequence: $MgSO_4 > NaCl > Na_2CO_3 > NaHCO_3 > CaSO_4 > Na_2SO_4$, and in lower concentration: $Mg(HCO_3)_2$, $MgCl_2$ and $CaCl_2$; Therefore the type of salinity in the ten soil profiles is sodic-chlorhidric-sulfatics.

The greatest proportion of trace and heavy metals, extractable and total, in these soil is found adsorbed and fixed to the soil, which is due to alkaline pH, causing their precipitation as hydroxides, carbonates, sulfates, or phosphates.

The high content of organic matter in these soils favors the formation of low mobility, complexes, decreasing the assimilation of heavy metals by plant roots. Trace and heavy metals tend to accumulate on the upper layers. Extractable trace and heavy metals (DTPA-TEA-CaCl₂) in the 10 profiles had levels with the following sequence: Fe>Mn>Zn>Cu>Ni>Pb>Cr>Cd. It is observed that Fe²⁺ in site 1>site 4>site 3>site 2; for Cu²⁺ and Mn²⁺ site 4>site 2>site 1>site 3; for Zn²⁺ site 4>site 1>site 2>site 3; for Pb²⁺ site 1>site 4>site 2>site 3; for Ni²⁺ the site 1>site 3>site 2>site 4 and finally for Cr³⁺ and Cd²⁺ site 2>site 4>site 1>site 3. By PIXE had the following sequence: Fe>Cd>Mn>Zn>Cr>Ni>Cu>Pb. For Fe site 1>site 2>site 3>site 4; for Cu and Mn site 4>site 3>site 2>site 1; for Zn site 4>site 2>site 3>site 1; for Pb site 4>site 3>site 1>site 2; for Ni site 4>site 1>site 2>site 3; for Cr site 4>site 3>site 2>site 1; for Cd site 1>site 3>site 4>site 2.

The application of Pb did not cause apparent toxicity. The treatments from 10 (30-0-0) and 16 (30-1000-0) to 18 (30-1000-1000) gave the highest response in the development of beet. This can be directly related to effect of NO₃ ion than to a Pb effect. The opposite effect was observed when Ni was applied; the treatments 1 (0-0-0), 2 (0-0-500) y 4 (0-500-0) resulted in a low development. The concentration of trace and heavy metals in the beet's foliage had the following sequence: Fe>Zn>Mn>Ni>Cu>Pb>Cr>Cd.

The extractable trace and heavy metals (DTPA-TEA-CaCl₂) in greenhouse soil before planting the beets had the following sequence: Pb>Ni>Fe>Mn>Zn>Cu>Cd>Cr. After the harvest the sequence was: Pb>Ni>Fe>Mn>Zn>Cu>Cr>Cd. The soil concentration of trace and heavy metals decreased after the harvest, due to the uptake by plants.

Total trace and heavy metals (PIXE) in greenhouse soil before planting the beet had the following sequence: Fe>Ni>Cd>Pb>Mn>Cr>Cu>Zn; after harvesting it, was: Fe>Ni>Mn>Pb>Cr>Zn>Cd>Cu.

CAPÍTULO 1

ORIGEN DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

El área de estudio se localiza dentro de la región geográfica conocida como la Cuenca de México, localizada en el borde meridional de la Mesa Central del Sur, sobre el cual se edificó un tramo del Eje Volcánico Transmexicano, esencialmente durante el Plioceno-Holoceno (De Cserna *et al.*, 1988). La cuenca está alargada en dirección NNE-SSW con longitud de unos 100 km y anchura de unos 30 km, delimitada al norte por la Sierra de Pachuca, al oriente por la Sierra de Río Frío y por la Sierra Nevada, al sur por la Sierra de Chichinautzin y al poniente por el Volcán Ajusco y la Sierra de las Cruces (Tapia y López, 2002).

Para Mooser (1963) y Demant y Robin (1975), citado por (Tapia y López, 2002) la Cuenca de México se originó a partir de los procesos volcánicos y tectónicos que se han estado desarrollando a partir del Eoceno, tras de haber emergido del océano gran parte de lo que ahora es México. En ese período se inició un conjunto de procesos eminentemente volcánicos, que con el tiempo produjo espesores de 2 km de lava, toba y brecha. Inicialmente la Cuenca estaba abierta al río Balsas; en ella desaguaban una gran cantidad de ríos pequeños que bajaban de las tierras aledañas al Valle de México.

Una de las ideas que se tienen sobre la formación del sur de la Cuenca de México es que su drenaje hacia el sur fue cerrado por la erupción de las lavas de los volcanes monogenéticos de la Sierra del Chichinautzin especialmente las del Xitle, de manera que las salidas de agua que antes bajaban hacia el sur en la Cuenca del Balsas se vio obturada, desembocando las aguas en la propia cuenca que se transformó en una cuenca cerrada o cuenca endorreica.

Durante muchos años al no existir una salida natural de desagüe se originó un gran Lago en el Centro del Valle de México, llamado por los aztecas el Lago de la Luna. Debido a posteriores alteraciones del régimen pluviométrico, se produjo la disminución del nivel del Lago dando origen a tres subcuencas: Zumpango, Xaltocán y San Cristóbal hacia el norte, México-Texcoco hacia el centro y Chalco-Xochimilco hacia el sur (Martín del Pozo, 1985).

Durante el Mioceno temprano, la actividad magmática generó rocas volcánicas y un fracturamiento de orientación W-E. En este período predominaron las erupciones de andesita y dacita, con un espesor promedio de 600 a 700 m. Estas rocas fueron erosionadas antes de que se presentaran las manifestaciones volcánicas del final del Mioceno (De Cserna *et al.*, 1988).

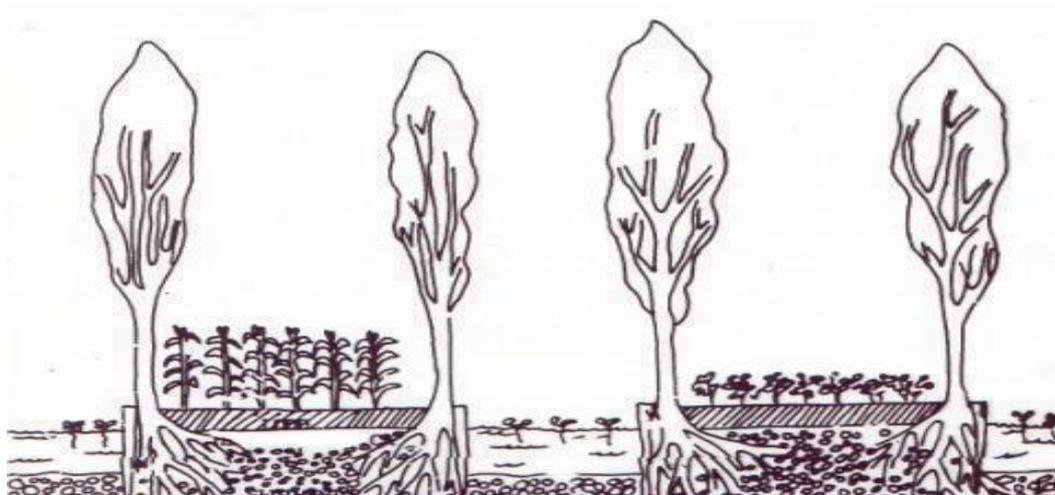


Figura 1.1. Diagrama de una chinampa tradicional construida con capas de hierba acuática, abono y tierra. Ahuejote plantado a lo largo y orilla de la chinampa.

1.1. HISTORIA DE LA ZONA CHINAMPERA

La chinampa se define como un islote artificial en ciénegas, pantanos o lagos de poca profundidad rodeados, por lo menos, en tres lados por canales con agua (West y Armilla, 1950).

Se le ha considerado como el sistema agropecuario más sostenible y diverso conocido hasta la fecha, además de ser el sistema agropecuario por excelencia en Mesoamérica con un mínimo deterioro ambiental en su explotación (Coe, 1971 citado por Vallejo, 1992).

La palabra *chinampa* proviene del nahuatl *Chinamitl* que quiere decir seto o cerca de cañas y *Pan* que significa sobre. Hoy día, se registra un marcado decaimiento que quizá conduzca a su extinción. Los primeros asentamientos humanos del área, datan de varios siglos antes de la era cristiana y que su ocupación terminó antes del período clásico de Teotihuacan (aproximadamente en el siglo I A. C.).

Antes de la llegada de los Aztecas, se inició un nuevo desarrollo chinampero que logró su nivel más intenso de expansión de 1400 a 1600 de nuestra era. Desde entonces, esta área ha mantenido una población muy densa de agricultores y ha sido durante varios siglos la principal fuente de abastecimiento de hortalizas para la Ciudad de México (Rojas, 1983 y 1990).

El proceso de desagüe ocasionó una baja considerable en el nivel del manto freático; aumentó el porcentaje de salitre, afectando negativamente la producción de legumbres.

1.1.1. Construcción y distribución de la chinampa

El sistema agrícola de *chinampas* del Valle de México reviste especial importancia por ser un sistema de origen prehispánico que se conserva hasta la actualidad y por haber sido desarrollado por un

pueblo que alcanzó un gran poderío en Mesoamérica, probablemente con fundamento en su agricultura, de igual modo que en otras grandes civilizaciones de la antigüedad, donde se correlacionó el auge agrícola con el desarrollo de la cultura (Palerm, 1972; Palerm y Wolf, 1972).

Las *chinampas* se caracterizan por pequeñas parcelas de tierra de forma rectangular y angosta, su tamaño, según Coe (1964), es de 100 a 500 m², sin embargo, en descripciones más antiguas (Leicht, 1937) menciona que las *chinampas* eran de aproximadamente 1000 m². Las *chinampas* se construyeron en zonas inundables mediante la transferencia y elevación del suelo sobre el nivel del agua, para lo que se utilizaba materia orgánica, lodo o cualquier material que permitiera consolidar estos islotes.

1.1.2. Diversificación de la producción

Cox y Atkins (1979), sostienen que los cultivos originales en el sistema de *chinampas* incluyeron maíz, frijol, calabaza y varias especies de amaranto de grano. Poco a poco se fueron introduciendo nuevos cultivos hasta llegar a la diversificación actual. Acerca de los cultivos prehispánicos de los trabajos de Chapa (1957) y Rojas (1983) se desprende la siguiente información:

Cultivos prehispánicos

Maíz	<i>Zea mays</i> L.
Frijol	<i>Phaseolus vulgaris</i> L.
Calabaza	<i>Cucurbita</i> spp.
Chile	<i>Capsicum</i> spp.
Jitomate	<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.
Huautli	<i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.
Chía	<i>Salvia</i> spp.
Chayote	<i>Sechium edule</i> (Jacq.) Sw.
Chilacayote	<i>Cucurbita ficifolia</i> Bouché
Quelites	<i>Maranthus</i> spp.
	<i>Prophyllum</i> spp.
	<i>Chenopodium</i> spp.
Lengua de vaca	<i>Rumex</i> spp.
Huanzontli	<i>Chenopodium nuttalliae</i> Saff.

Chapa (1957) indica que en esa época se cultivaba en forma continua a lo largo de todo el año, produciéndose hasta cuatro cultivos al año por chinampa. Todos los cultivos mencionados podían sembrarse sin seguir una secuencia preestablecida, guiándose únicamente por la experiencia de siembras anteriores.

La floricultura no tenía un fuerte arraigo, sólo se practicaba en pequeña proporción. Después se inició la ganadería de solar con el manejo de aves y vacas dentro de las *chinampas* que se empezaron a poblar.

Situación del sistema de *chinampas*: (López, 1988)

<i>Chinampas</i> cultivadas	40%
<i>Chinampas</i> cultivadas con hortalizas	25%
<i>Chinampas</i> cultivadas con flores	15%
<i>Chinampas</i> no cultivadas	60%
<i>Chinampas</i> productivas para pastizal	30%
<i>Chinampas</i> improductivas y abandonadas	30%

La producción hortícola sigue siendo predominante en el sistema de *chinampas*, pero algunos cultivos tradicionales han sido eliminados debido a que los cambios producidos en el sistema los han afectado negativamente.

Entre los cultivos hortícolas de mayor importancia en el sistema se encuentran los siguientes:

Acelga	<i>Beta vulgaris</i> L. var. <i>cicla</i> .
Apio	<i>Apium graveolens</i> L.
Berza	<i>Brassica oleracea</i> var. <i>geminifera</i> (DC.) Zenker
Brócoli	<i>Brassica oleracea</i> L var. <i>botrytis</i> .
Cilantro	<i>Coriandrum sativum</i> L.
Coliflor	<i>Brassica oleracea</i> L var. <i>botrytis</i> .
Epazote	<i>Chenopodium ambrosoides</i> L.
Escarola	<i>Chichorium endivia</i> var. <i>rizada</i>
Espinaca	<i>Spinacea oleracea</i> L.
Perejil chino	<i>Petroselinum crispum</i> (Mill.) Nyman ex A.W. Hill
Lechuga romana	<i>Lactuca sativa</i> L.
Romero	<i>Suaeda diffusa</i> S. Watson
Verdolaga	<i>Portulaca oleracea</i> L.
Hierbabuena	<i>Mentha sativa</i> L. Reichemb. (López, 1988).



Figura 1.2. Chinampero extrayendo el lodo del fondo de los canales para la construcción de chapines.



Figura 1.3. Vista panorámica de una chinampa rodeada de *Salix bomplandiana* Kunth y cultivada con *Mathiola incana* L. en Xochimilco, D.F.

1.1.3. Características Botánicas y Taxonómicas de *Beta vulgaris* L. var. *cicla*

Para este trabajo se eligió la acelga porque se desarrolla muy bien en suelos alcalinos, con un rango de pH de 6.5 a 7.5; ya que al igual que el betabel, es sensible a la acidez del suelo. En cuanto a la salinidad, está clasificada como altamente tolerante con valores de 6 400 a 7 680 ppm (10 a 12 dS m⁻¹).

Familia:	Chenopodiacea
Género:	<i>Beta</i>
Especie:	<i>vulgaris</i>
Variedad Botánica:	<i>cicla</i>
Nombre común:	acelga

La acelga es una planta bianual que no forma parte comestible (hipocotilo) como el betabel. Para que se presente la floración necesita pasar por un periodo de bajas temperaturas (vernalización). El vástago floral es igual al del betabel y alcanza una altura promedio de 1.20 m. Las hojas que constituyen la parte comestible, pueden ser onduladas y/o arrugadas dependiendo del cultivo los pecíolos pueden ser de color crema o blancos. Las semillas son muy pequeñas y están encerradas en un pequeño fruto (Maroto, 1990, 1995).

La acelga es una hortaliza cuya parte comestible la constituyen las hojas, aunque también pueden consumirse los pecíolos; se le considera como una planta semiperenne y de rebrote. En México esta planta tiene poca demanda en comparación con las demás hortalizas de hoja, a pesar de su gran contenido de vitamina A y C.

a. Requerimientos de clima

La acelga es una hortaliza de clima frío, tolera heladas y temperaturas calientes y en México se puede explotar todo el año. La temperatura requerida para su germinación es de 10 a 25°C, emergiendo los cotiledones a los 8-10 días. La temperatura óptima para su buen desarrollo es de 15 a 18°C; sin embargo, puede desarrollarse a temperaturas altas. A temperaturas de 4.5 a 10°C emite el vástago floral, recomendándose dejar de cortar las hojas debido a que disminuye su calidad y tamaño. En algunas regiones tropicales y subtropicales se desarrolla bien, siempre y cuando esté en grandes altitudes, y puede ser perenne debido a la ausencia de invierno de estas regiones (Messiaen, 1979; Varadez, 1994).

b. Requerimientos de suelo y fertilización

Esta hortaliza se desarrolla en cualquier tipo de suelo, pero prefiere los arcillo-arenosos.

Con respecto a la fertilización comercial, en México existe poca información, pero el INIA reporta dos fórmulas generales:

N-P-K 80-40-0

N-P-K 129-60-0

c. Prácticas de cultivo

Herbicidas. Pyramín RB 75 (pyrazón) 1.5-2.0 kg.ha⁻¹ Pre.**Roundup (glisofato) 1.0-1.5 1 ha⁻¹ Post.*** Treflán (trifluralina) 1.0-2.0 1 ha⁻¹ Inc.*

Escarda. Esta labor, al igual que en el betabel, se recomienda que sea ligera y efectuando sólo las necesarias, ya que esta práctica consiste en aflojar el suelo y tener un buen control de malezas.

Aporque. Después de haber realizado la escarda se efectúa la segunda aplicación de nitrógeno, e inmediatamente después se lleva a cabo el aporque con el fin de cubrir el fertilizante y darle más apoyo a las plantas.

Riegos. La acelga muestra un comportamiento de desarrollo semiperenne, por lo que se riega con intervalos promedio de 18 días (Diehl *et al.*, 1978).

d. Plagas y enfermedades

La pulga saltona (*Chaetocnema confinis* Crotch.) y la doradilla (*Diabrotica spp*) representan un fuerte problema en la etapa de plántula, sobre todo cuando las plántulas empiezan a emerger. Cuando la planta está en estado adulto, ocasionalmente se presentan algunos gusanos, siendo estos ataques poco severos. Por lo que respecta a la cenicilla vellosa (*Peronospora efusa* Grev. Ex. Desm.), no representa un problema de importancia, pudiendo controlarse fácilmente con los fungicidas mencionados (Varadez, 1994).

e. Cosecha

La acelga es una hortaliza de rebrote, o sea que al cortar las hojas, éstas vuelven a brotar; por lo general la longitud de las hojas es un indicador visual de cosecha, siendo el tiempo otro parámetro. Es recomendable cortar las hojas con cuchillos o navajas bien afilados, evitando dañar el cogollo o punto de crecimiento, ya que esto podría provocar la muerte de la planta.

- **Tiempo.** Transcurridos 60-70 días se hace el primer corte y después cada 12-15 días.
- **Longitud.** Cortar las hojas exteriores cuando tengan una longitud mayor de 25 cm (Diehl *et al.*, 1978).

1.2. CONTAMINACIÓN Y DESECACIÓN DE LAS CHINAMPAS

El área de *chinampas* en producción se ha reducido notablemente. Una buena parte del antiguo lecho lacustre todavía conserva la forma del área chinampera, pero muchos canales están secos y el abono vegetal es escaso, de manera que dos de los rasgos fundamentales del cultivo de *chinampas*, la siembra continua y el riego, ya no son posibles (Rojas, 1983).

A medida que la ciudad ha crecido el Valle se ha desecado. La mayoría de los manantiales que antes alimentaban el Lago de Chalco-Xochimilco han sido entubados en un enorme ducto que lleva el agua a la ciudad, dejando a las *chinampas* demasiado altas y secas.

El cultivo de *chinampas* es limitado en las siguientes comunidades: Xochimilco, Acalpixca, Atlapulco, San Luís Tlaxialtemalco, Tulyehualco, Ixtayopan, Tláhuac, Tetelco, Atzompa y Míxquic. San Gregorio Atlapulco tiene la mayoría de sus *chinampas* produciendo a toda su capacidad (López, 1988; Rojas, 1990).

1.2.1. Aumento de la salinidad en el suelo

Los problemas que se presentaron en el suelo y que repercutieron en la producción son variados, uno de ellos es el aumento de pH (9.3) lo que motivó que zonas enteras hayan tenido que abandonarse por estar completamente ensalitradas. En las partes superficiales de los suelos salinos y sódicos de las *chinampas*, se acumulan altas concentraciones de bicarbonatos y carbonatos de sodio.

El pH en el sistema de *chinampas* no es el mismo en toda su extensión, algunas zonas ya presentaban condiciones de alta salinidad desde la década de los 70s; por ello se dedicaban a producir cultivos resistentes a la salinidad (López, 1988; Rojas, 1990).

1.2.2. La erosión del suelo

La alta contaminación del agua que irriga los canales de las *chinampas* ha ocasionado poco a poco la muerte de los árboles de ahuejote *Salix bomplandiana* Kunth, que son básicos para evitar la erosión de las *chinampas*, ya que por el desarrollo de su sistema radical permiten la retención del suelo en las orillas de las *chinampas*, favoreciendo a la vez el paso de los rayos solares a los cultivos porque desarrollan su ramaje en forma vertical. Actualmente se observa que un 90% de ellos tienen sus puntas secas, encontrándose la zona meristemática completamente dañada, sin posibilidades de regeneración.

El diámetro de los ahuejotes mayores en 1970 era de 1 m y en 1983 sólo de 50 cm (López, 1988; Rojas 1990).

1.2.3. Las plagas en el sistema de chinampas

Por la alta contaminación que acarrean las aguas negras semitratadas de la Ciudad de México, aunado a que ya no existen bosques aledaños en el propio sistema, la cantidad y calidad de los árboles ha bajado; además se tiene un gran número de plagas que ha sido necesario combatir con plaguicidas comerciales.

La adición de plaguicidas y el riego con agua contaminada trae como consecuencia que los productos así tratados, provoquen daños a la salud de los consumidores; y aunque estos factores se encuentran aún sin valorar, es evidente la necesidad de su control para todos los sistemas agrícolas de producción (López, 1988).

1.2.4. Abandono de prácticas adecuadas

El sistema de *chinampas* ha sido uno de los más productivos y estables debido a las bases naturales en las que se sustenta como es el uso de fertilizante orgánico (abono de origen animal, lodo de detritos orgánicos y abono verde) con elementos como lirio de agua o huachinango *Eichornia crassipes*, (Martius) Solms, chichicastle *Lemna spp* etc., como restituyente de fertilidad.

La utilización de lirio de agua *Eichornia crassipes* (Martius) Solms, chichicastle *Lemna spp.*, y otros restos vegetales como fertilizantes ha sido benéfico en razón de que se forma una capa esponjosa que permite el buen desarrollo de las raíces. Actualmente la práctica de nivelación de *chinampas* ya no se sigue y se trata de utilizar lo menos posible abono verde, incrementando el uso inmoderado de fertilizantes químicos, todo lo cual ha repercutido el desequilibrio del ecosistema. La utilización de lirio acuático y su alta proliferación en los canales lo convierte en una plaga e impide el acceso a las *chinampas* más alejadas de los embarcaderos, las *chinampas* de bajo nivel se inundan frecuentemente en la época de lluvias, con la consecuente pérdida del cultivo. (Rojas, 1983; López, 1988).

1.3. RESCATE DE LAS CHINAMPAS

Xochimilco, fue declarado por la UNESCO Patrimonio Cultural de la Humanidad en diciembre de 1987.

Por ello el *plan de rescate ecológico* pretendió atender integralmente los problemas hidráulicos de esta importante reserva agrícola y ecológica (Rojas 1990).

1.3.1. Planta de tratamiento de agua residual Cerro de la Estrella

En 1957, se comenzó la alimentación artificial de los canales, primero con los ríos Churubusco y San Buenaventura, por el cauce abierto del Canal Nacional, y en 1959, con aguas negras tratadas de la planta de Aculco, Coyoacán. En 1971, la nueva planta del Cerro de la Estrella de la Delegación Iztapalapa del DDF., aportó el agua residual a los canales de Xochimilco, Atlapulco, Tlaxialtemalco y Tláhuac, a través de una red subterránea. Actualmente 1,734 lps se conducen a nivel secundario a Xochimilco, Tláhuac, San Luís Tlaxialtemalco, San Gregorio Atlapulco, San Juan Ixtayopan, y San Andrés Mixquic para riego agrícola (DGCOH, 2001). Esta planta tiene una superficie de aproximadamente 9 ha.

En la actualidad el sistema de tratamiento de aguas residuales en el DF cuenta con la siguiente infraestructura: 21 plantas de tratamiento de las cuales 17 son a nivel secundario y 4 a nivel terciario con una capacidad en conjunto de 6250 lps, equivalente al 20 % de las aguas residuales generadas en la ciudad de México (DGCOH, 2001). Con este caudal se riegan aproximadamente 6,500 ha de áreas verdes y 6,000 agrícolas y se renuevan 3,500 millones de litros de agua en lagos, lagunas y 360 mil metros de canales, que ocupan una superficie de 230 ha.

Las aguas residuales que recibe la planta del cerro de la estrella, provienen de la estación de bombeo Aculco situada en el cruce de las avenidas de río Churubusco y de Apatlaco en la Delegación Iztacalco.

El tratamiento de las aguas residuales, en la planta Cerro de la Estrella, se efectúa mediante el proceso biológico convencional de lodos activados y filtración con arena, grava y antracita, más desinfección con cloro (DGCOH, 2001).

1.3.2. Uso del agua residual tratada

Del caudal tratado en la planta Cerro de la Estrella el 56% se emplea en el llenado de canales y lagos recreativos, así como en el riego agrícola en la zona chinampera de Mixquic, Tláhuac y Xochimilco; 25% para la recarga del acuífero; 8% se utiliza en el sector industrial; 8% en el riego de áreas verdes, principalmente en las zonas de Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco, y el restante 3% se emplea en el sector comercial, básicamente para el lavado de automóviles, autobuses y carros del sistema de transporte colectivo Metro (DGCOH, 2000).

CAPÍTULO 2

SUELOS AFECTADOS POR SALES EN EL MUNDO

Los suelos afectados por sales en nuestro planeta pueden ser encontrados en todos los países, y en todas las latitudes; sin embargo, lo más común es encontrarlos asociados a las zonas áridas, sobre todo entre los trópicos de Cáncer y Capricornio. También se encuentran en todas las costas, en marismas y manglares. Cerca de 340 millones de hectáreas (23%) presentan problemas de salinidad, y 560 millones más (37%) presentan problemas de sodicidad en mayor o menor grado (Tanji, 1990). Dentro de las tierras abiertas al riego, en todo el mundo, un poco más de 200 millones de hectáreas son suelos salinos y sódicos y representan de un 25 a un 33% (Carter, 1975; Bresler *et al.*, 1982).

2.1. SUELOS SALINOS Y SÓDICOS EN MÉXICO

México es un país donde se presenta una amplia gama de condiciones climáticas, pero las zonas áridas y semiáridas ocupan cerca del 40% de la superficie nacional, siendo frecuente encontrar condiciones de salinidad en los suelos. Existen también diversas cuencas cerradas donde se presentan fuertes acumulaciones de sales, existiendo amplias zonas costeras ocupadas por suelos salinos. No existe una evaluación precisa de las superficies de los suelos con problemas de salinidad y sodicidad en México, sobre todo en las áreas no agrícolas. Con lo anterior, Ortiz (1992) señala de manera aproximada la presencia de 3.5 millones de hectáreas afectadas en las zonas áridas y semiáridas, un millón en otras zonas no agrícolas, 800 000 en las áreas costeras, un millón en áreas agrícolas de temporal; y sólo en las áreas bajo riego, se estima la existencia de más de 520 000 hectáreas afectadas (SARH, 1984), lo cual totaliza unas 6.8 millones de hectáreas de suelos afectados por sales en todo el país.

2.2.1. ORIGEN DE LA SALINIDAD

Las sales presentes en los suelos salinos proceden del intemperismo de los minerales y rocas que constituyen la corteza terrestre. Los elementos que participan en los suelos salinos son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} y con menor frecuencia, NH_4^+ , BO_3^- y I^- (Kovda *et al.*, 1967).

El intemperismo de las rocas por si solas rara vez ha ocasionado que se acumulen grandes cantidades de sales en un lugar. La secuencia de extracción de iones de sus rocas y minerales, su velocidad

de emigración y su capacidad de acumularse en las depresiones en forma de sales, son inversamente proporcionales al coeficiente de energía de esos iones (Pizarro, 1978). Por lo tanto, los Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y CO_3^{2-} de iones alcalinos y alcalinotérreos, son las sales que con más facilidad han de formarse como consecuencia del intemperismo de la corteza terrestre. En cambio, la precipitación ocurre en orden inverso. Por esa razón el NaCl permanece más tiempo en las soluciones.

Las aguas cargadas de sales procedentes del intemperismo de la corteza terrestre se acumulan en las depresiones, bien subterráneamente, constituyendo mantos freáticos salinos, o bien superficialmente, dando lugar a charcas, lagunas, lagos, etc. Esto se va facilitando por el hecho de que, con frecuencia, las depresiones tienen mal drenaje natural por sus condiciones topográficas y porque en las áreas bajas suelen acumularse arcillas arrastradas por el agua de escorrentía (Richards, 1985).

La mineralización progresiva de las aguas salinas depende de factores climáticos e hidrogeológicos. Los lavados con agua de lluvia eliminan sales de la zona. La evaporación y transpiración consume grandes cantidades de agua, pero no afecta prácticamente a las sales disueltas por lo que aumenta la concentración salina de las aguas. En áreas donde predominan los factores que salinizan a los suelos (evaporación y transpiración) frente a los de lavado, las aguas freáticas irán paulatinamente mineralizándose.

Cuando las aguas freáticas salinizadas se encuentran próximas a la superficie del terreno (menos de 3 m), éste puede salinizarse como consecuencia del aporte capilar de sales procedentes del agua freática, que se acumulan en los horizontes superiores.

Las sales así acumuladas pueden permanecer en la solución del suelo, en cuyo caso su principal efecto es alterar la asimilación de agua y nutrientes por las plantas. Otras veces, cuando el contenido de Na^+ es elevado en relación con los demás cationes, este elemento puede ser adsorbido por el complejo de intercambio catiónico en cantidades excesivas. En este caso las partículas arcillosas pueden dispersarse, el suelo pierde su estructura y se hace impermeable.

La naturaleza de las sales acumuladas depende del origen de las aguas. En áreas continentales suelen predominar los CO_3^{2-} , SO_4^{2-} y Cl^- . En las llanuras costeras, la sal predominante es el NaCl . En los deltas se acumulan aguas continentales y marinas. A veces el Na_2CO_3 se forma en el propio sitio, a partir del CO_2 de la atmósfera del suelo y del Na^+ contenido en éste (Aceves, 1979; Ortiz, 1991 y 1992).

2.2.1. Salinización primaria

En casi todos los estados de la República Mexicana se encuentran suelos salinos cuyo origen se atribuye a causas naturales. En las zonas áridas y semiáridas, el clima favorece la acumulación de las sales, y esto se asocia frecuentemente a la presencia de mantos freáticos elevados y salobres (Aceves, 1979; Ortiz, 1991 y 1992). La formación de Cuencas como la del Valle de México rodeada de un gran número de volcanes estratigráficos, corrientes de lavas, tobas, brechas y depósitos laháricos atravesado por chimeneas volcánicas y diques; y constituida por diferentes tipos de rocas como basaltos, andesitas basálticas, andesitas con anfíbolos, piroxenas, dacitas, latitas y que al intemperizarse liberan una gran cantidad de

cationes alcalinos y alcalinotérreos formando las sales. Esta cuenca cerrada contiene varios lagos someros, siendo el de Texcoco el mayor y el que ocupa el espacio más bajo en el centro. Le sigue en importancia el lago de Zumpango, en el noroeste, mientras que el Lago de Chalco, hasta hace poco el tercero en importancia, dejó de existir a principios del siglo pasado (SRH, 1961).

2.2.2. Salinización secundaria y sus causas

En las áreas agrícolas de México existen grandes extensiones de suelos afectados por sales y sodio, donde el problema ha surgido de manera secundaria, es decir, a causa de la actividad humana, al romperse el equilibrio que existe entre los procesos naturales de lavado y acumulación de sales de los suelos. En algunos casos, el grado de afectación es ligero, pero en muchos otros casos la salinidad se presenta como el principal factor limitante para la agricultura, y extensas áreas han sido abandonadas por este motivo.

Las causas de la aparición de problemas de salinidad en los suelos de las áreas de riego en México consisten, en la aplicación de aguas de mala calidad agrícola en suelos desprovistos de sistemas de drenaje adecuado y bajo condiciones climáticas de alta evaporación. Este proceso ha resultado en la elevación de los mantos freáticos y, cuando el agua de estos mantos alcanza por capilaridad la superficie del suelo, comienza a producirse un ascenso de las sales a la superficie (Aceves, 1979; Ortiz, 1991 y 1992).

2.3. MECANISMO DE TRANSPORTE DE LAS SALES

Si las sales liberadas por los procesos de intemperismo permanecieran en su lugar de origen, no tendrían tanta importancia. Los problemas surgen realmente, cuando son transportadas, ya que dicho transporte normalmente produce acumulaciones, intensificando los problemas asociados con el ensalitramiento.

Con excepción del transporte atmosférico de sales, en todos los ciclos de acumulación, el movimiento de las sales está íntimamente relacionado con el movimiento del agua. Las sales disociadas en forma iónica se mueven con el agua a través del suelo, de los estratos rocosos en las corrientes superficiales y las corrientes subterráneas.

La concentración de sales o cantidad de sales transportada por el agua depende de: la distancia del recorrido, los materiales geológicos con los que el agua ha estado en contacto, el tiempo de contacto y el clima (Aceves, 1979).



Figura 2.1. Vista panorámica de una chinampa afectada por la salinidad. Nótese el deficiente desarrollo de los cultivos en Tláhuac, D.F.



Figura 2.2. Vista de un canal desarrollándose una gran cantidad de *Eichornia crassipes* (Martius) Solm, evitando el paso por lancha en Xochimilco, D.F.

2.3.1. Principales tipos de sales en suelos y aguas

El agua y los suelos salinos de zonas semiáridas y áridas contienen electrolitos en solución. Se trata de Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- de metales del grupo IA y IIA de la tabla periódica. Las concentraciones de sales a las que se empieza a manifestar un estrés salino son relativamente bajas.

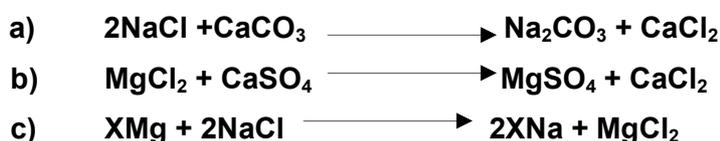
El tipo de sales tiene incidencia sobre la importancia del estrés salino. Sin que cambie la mineralogía de las sales se presenta una complejidad y variabilidad espacio-temporal, en función de la

temperatura y la humedad del medio en que cristalizan. Se consideran como más representativos los siguientes tipos de sales (Kovda *et al.*, 1967).

a) Cloruros

Los Cl⁻ y SO₄²⁻ son más frecuentes en la formación de suelos salinos. Los Cl⁻ son sales muy solubles y con una toxicidad alta. El NaCl es la sal más frecuente en suelos salinos. La eliminación de esta sal requiere el lavado en condiciones de buen drenaje. La presencia de NaCl afecta la solubilidad de otras sales que por efecto de ión común disminuye al aumentar la concentración de NaCl (Kovda *et al.*, 1967).

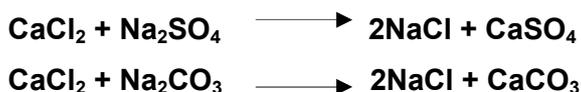
La acumulación de MgCl₂ se produce en suelos con una salinidad extremadamente alta. Es una sal altamente tóxica y muy perjudicial para las plantas. Se puede formar si el suelo recibe aguas ricas en iones Cl⁻ y Na⁺, el intercambio con el Mg²⁺ puede tener lugar por medio de reacciones del tipo:



El MgCl₂ hace que se mantenga húmedo la superficie del suelo mucho tiempo después de una lluvia. Esto se debe a que esta sal es muy higroscópica y puede absorber agua del aire cuando la atmósfera no está totalmente seca.

La mejora de los suelos con MgCl₂ es difícil ya que por el efecto de dilución de valencia, el Mg²⁺ tenderá a ocupar lugares de intercambio desplazando los iones monovalentes durante el lavado.

El CaCl₂ es una sal muy poco frecuente en los suelos, principalmente por la mayor estabilidad de otras sales a las que puede dar lugar:



El CaCO₃ precipita y el NaCl formado puede perderse por lavado, con lo que la reacción progresa hacia la derecha.

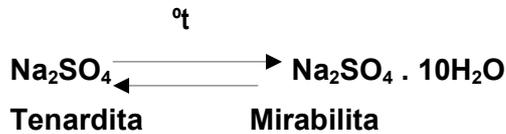
La formación de CaCl₂ se debe a una reacción análoga a la del MgCl₂:



El KCl es una sal de propiedades análogas a las del NaCl. Es muy poco frecuente en los suelos salinos debido a que el K⁺ puede ser fijado internamente dentro de las celdas cristalinas de los diferentes minerales arcillosos de los suelos; en este caso el K⁺ es adsorbido.

b) Sulfatos

El Na_2SO_4 es un componente frecuente en los suelos salinos. Su composición molecular varía con la humedad, lo que da lugar a dos especies mineralógicas diferentes:



De acuerdo con el comportamiento del Na_2SO_4 , durante el periodo cálido esta sal será transportada a la parte superior del suelo, al igual que otras sales, pudiendo dar lugar a eflorescencias blancas en la superficie.

El MgSO_4 es un constituyente frecuente, muy soluble y altamente tóxico. Su lavado resulta difícil.

El K_2SO_4 no es responsable de salinizaciones en condiciones naturales, limitándose a crear problemas allí donde se realice un mal uso de abonos, generalmente en invernaderos. En orden de toxicidad decreciente el K_2SO_4 es el menos tóxico: $\text{K}_2\text{SO}_4 < \text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{MgSO}_4$.

c) Carbonatos y bicarbonatos de sodio

La presencia de CO_3^{2-} y HCO_3^- indica condiciones fisicoquímicas especiales, ligadas a procesos de alcalinización del suelo ($\text{ESP} > 15\%$). Los suelos con Na_2CO_3 y NaHCO_3 tienen un pH superior a 9, pudiendo llegar a 12. Esta fuerte alcalinidad crea un medio inadecuado para el crecimiento de la mayoría de las plantas. La hidrólisis del Na_2CO_3 es el origen de valores de pH tan elevados.



Los efectos desfavorables del Na_2CO_3 se dejan sentir a partir de concentraciones del orden de 0.05 a 0.1% de esta sal. El NaHCO_3 da lugar a unas condiciones menos alcalinas y por consiguiente menos tóxicas:



En medios naturales que contengan yeso, el Na_2CO_3 tenderá a desaparecer debido al intercambio de bases entre dos sales solubles en las soluciones salinas.



El CaCO_3 formado así tenderá a precipitarse y como el Na_2SO_4 es de muy alta solubilidad, entonces este compuesto salino quedaría.

A escala mundial hay suelos sódicos (alcalinos) en las praderas de Estados Unidos, el Oeste de Canadá, en el antiguo Lago de Texcoco en México, Manchuria, Siberia, la llanura rusa, la depresión húngara y el área monzónica de India y Pakistán.

d) Nitratos

Los NaNO_3 son raros en los suelos salinos. Se han citado en desiertos muy áridos de Chile, Perú, India, etc. Son sales muy solubles y muy tóxicas.

2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS AFECTADOS POR SALES Y SODIO

Los suelos afectados por sales y sodio de acuerdo al Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos se clasifican en salinos, sódicos no salinos y salino-sódicos.

2.4.1. Suelos salinos

El término “salino” se aplica a suelos con una conductividad del extracto de saturación mayor de 4.0 dS m^{-1} a 25°C , con un porcentaje de sodio intercambiable $<$ de 15. Generalmente el pH es menor de 8.5. Estos suelos corresponden al tipo descrito por Hilgard (1906) como “álcali blanco” y a los “Solonchaks” de los autores rusos; presentan costras blancas de sal en su superficie.

Las características químicas de los suelos salinos quedan determinadas principalmente por el tipo y cantidad de sales presentes. La cantidad de sales solubles presentes controla la presión osmótica de la solución del suelo. Las cantidades relativas de calcio y magnesio presentes en la solución del suelo y en el complejo de intercambio, varían considerablemente. Tanto el potasio soluble, como el intercambiable son, en general, constituyentes de menor importancia, aun cuando ocasionalmente se tornen en constituyentes mayores. Los aniones principales son: Cl^- , SO_4^{2-} y a veces el NO_3^- (Richards, 1985).

2.4.2. Suelos sódicos no salinos

Suelos con porcentaje de Na^+ intercambiable mayor de 15 y la conductividad del extracto de saturación menor de 4 dS m^{-1} a 25°C . El pH generalmente varía entre 8.5 y 10. Estos suelos corresponden a los llamados “álcali negro” por Hilgard y, en ciertos casos, a los “Solonetz” de los autores rusos. Con frecuencia se encuentran en regiones áridas y semiáridas en áreas pequeñas e irregulares conocidas como “manchas de álcali impermeables”. Siempre que en los suelos o agua de riego no se encuentre yeso, el drenaje y lavado conduce a la formación de suelos sódicos no salinos. En los suelos altamente sódicos, la

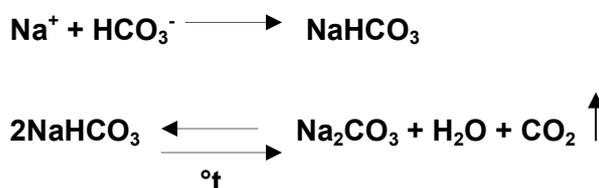
materia orgánica dispersa y disuelta puede depositarse en la superficie debido a la evaporación, causando así un ennegrecimiento y dando origen al término “álcali negro” (Richards, 1985; Aragües y Cerdá, 1998; Aceves, 1979).

La formación de suelos sódicos está íntimamente ligada a la formación de carbonato de sodio, aunque en algunos casos los suelos pueden convertirse en sódicos en ausencia de esta sal.

Se han establecido diferentes mecanismos explicando la formación de carbonato de sodio en el suelo. Hilgard, propuso que la formación de Na_2CO_3 puede ocurrir a partir de la reacción de sales neutras:

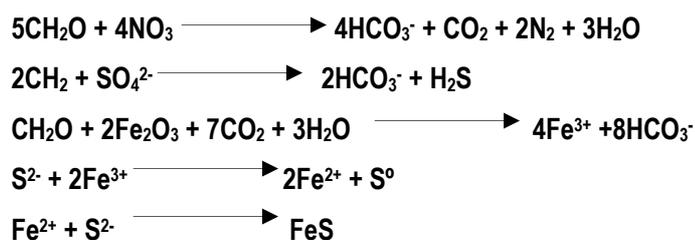


Otra forma como se produce Na_2CO_3 fue propuesta por Eaton (1939) citado por Porta *et al.*, (1999) indicando que es debido a los HCO_3^- contenidos en el agua de riego cuando en la solución del suelo se encuentra Ca^{2+} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Na^+ y Mg^{2+} mediante los procesos de humedecimiento y secado se forman CaCO_3 y MgCO_3 que se precipitan; si queda HCO_3^- y/o CO_3^{2-} reaccionan con el Na^+ formando Na_2CO_3 .



La formación de suelos sódicos bajo condiciones de anaerobiosis, abundancia de materia orgánica de rápida oxidación y presencia de una concentración moderada de Na_2SO_4 ; se lleva a cabo mediante los pasos siguientes:

1. **Reducción biológica de NO_3 y de SO_4** (Antipov-Karataev, 1967).



2. Cuando se tiene en los suelos una reacción alcalina, debido a los procesos de introducción del ión Na^+ al complejo de intercambio catiónico, la persistencia de la alcalinidad en las soluciones de los suelos se debe al siguiente proceso (Antipov-Karataev, 1967).



También aparecen las soluciones de los suelos sódicos una reacción alcalina debido a la hidrólisis de los humatos (Kovda *et al.*, 1967).



El NaHCO_3 es muy soluble y se mueve por capilaridad con la solución del suelo, el agua se evapora y la sal se acumula en la superficie, pierde CO_2 y se forma Na_2CO_3 . La razón por la cual todos los suelos que contienen Na_2CO_3 tienen un pH elevado, se debe a que al hidrolizarse el Na_2CO_3 se forma NaOH como se muestra en la siguiente reacción:



Después de largo tiempo, los suelos sódicos no salinos adquieren características morfológicas peculiares. Debido a la gran dispersión de la arcilla parcialmente saturada con Na^+ , ésta puede ser transportada hacia abajo, acumularse en los niveles inferiores y como resultado, unos cuantos centímetros de suelo superficial pueden presentar textura relativamente gruesa y quebradiza, aunque más abajo, donde se acumula la arcilla, el suelo puede desarrollar una capa densa y de baja permeabilidad, con estructura prismática o columnar. Sin embargo, es común que en esos suelos se presenten concentraciones altas de Na^+ como consecuencia de la irrigación, lo cual indica que no ha pasado mucho tiempo para el completo desarrollo de la estructura columnar típica, pues el suelo tiene baja permeabilidad y es muy difícil de labrarse.

El Na^+ intercambiable en un suelo sódico no salino puede tener una marcada influencia en sus propiedades físicas y químicas. Al aumentar la proporción del Na^+ intercambiable, el suelo tiende a ser más disperso y el pH aumenta a veces hasta el valor de 10. Mientras los aniones presentes consisten en su mayor parte de Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- , también pueden presentarse pequeñas cantidades de CO_3^{2-} . A pH muy elevado y en presencia de iones CO_3^{2-} , el Ca^{2+} y el Mg^{2+} se precipitan, de manera que las soluciones del suelo, de suelos sódicos no salinos, usualmente contienen sólo pequeñas cantidades de estos cationes, predominando el Na^+ (Richards, 1985; Aragües y Cerdá, 1998; Aceves, 1979).

2.4.3. Suelos sódicos-salinos

Son aquellos suelos cuya conductividad del extracto de saturación es $>$ de 4.0 dS m^{-1} a 25°C y el porcentaje de sodio intercambiable es $>$ de 15; este tipo de suelos se forma como resultado de los procesos combinados de salinización y acumulación de Na. Siempre que contengan un exceso de sales, su apariencia y propiedades son similares a las de los suelos salinos. Cuando hay exceso de sales el pH puede alcanzar valores de 8.5, 9.0 y 10.0 raramente es mayor de 8.5 y las partículas aparentemente se encuentran floculadas. Si el exceso de sales solubles es lavado, las propiedades de estos suelos pueden cambiar notablemente, llegando a ser idénticas a las de los suelos sódicos no salinos. A medida que la concentración de sales disminuye en la solución, parte del Na intercambiable se hidroliza para formar NaOH que, a su vez, se transforma a Na_2CO_3 . En cualquier caso, el lavado de un suelo puede hacerlo mucho más alcalino ($\text{pH} >$ de 8.5), las partículas se dispersan y el suelo se vuelve desfavorable para la entrada de agua y para las labores de labranza. Aunque el retorno de las sales solubles puede hacer que baje el pH y restaure las partículas a una condición floculada. El manejo de los suelos sódicos-salinos sigue siendo un problema hasta que se elimina el exceso de sales y de Na intercambiable de la zona del cultivo y se restablecen las condiciones físicas del suelo (Richards, 1985; Aceves, 1979; Aragües y Cerdá, 1998).

A veces estos suelos sódicos-salinos contienen yeso y cuando son lavados, el Ca^{2+} se disuelve reemplazando al Na intercambiable. Esto tiene lugar con la eliminación simultánea del exceso de sales.

2.5. EFECTO DE LA SALINIDAD SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

Las propiedades físicas del suelo son determinantes en el desarrollo de las plantas, entre las más importantes se tienen la capacidad de retención de humedad, la aireación, la temperatura, las propiedades mecánicas y algunas propiedades físico-químicas como la capacidad de intercambio iónico y el pH. Asimismo son importantes la cantidad y tipo de minerales arcillosos presentes. Todas estas características pueden ser modificadas drásticamente por la cantidad y tipo de sales presentes en forma disociada en la solución del suelo.

La conductividad hidráulica cambia, debido a que hay interacción entre las partículas del suelo, principalmente arcillas, y las sales que están disueltas en el agua, haciendo que cambie la porosidad. Esto ocurre debido a que algunas partículas de arcilla, sobre todo las arcillas expandibles acomodadas dentro de los macroporos, se hinchan y producen una reducción de la macroporosidad. Este fenómeno es aún mucho más notable, cuando una proporción considerable de los sitios de intercambio de las arcillas son ocupadas por el ión Na^+ .

El Na^+ produce una expansión muy pronunciada de las arcillas, y en suelos de textura ligera, pueden sufrir cambios muy notables en su permeabilidad. (Aceves, 1979; Tanji, 1990; Porta y Herrero, 1996).

Cuando un suelo se sodifica, los coloides orgánicos y minerales se dispersan y se produce una migración de ellos dentro del perfil. Los coloides orgánicos se mueven hacia arriba con el agua y se acumulan en la superficie del suelo, dando la coloración "negra aceitosa" de los suelos sódicos. Esto hace que al cambiar la coloración del suelo, se absorba más calor y se modifique la temperatura del mismo.

Los coloides minerales emigran hacia abajo del perfil. Este proceso es irreversible y causa taponamiento de los poros, lo que aunado con la expansión, modifica la permeabilidad afectando el movimiento del agua, del aire, produciendo cambios en la estructura, en la densidad aparente, en la estabilidad de los agregados, en la impedancia mecánica y formando costras que impiden la germinación de las semillas. (Aceves, 1979; Richards, 1985).

Cuando los cationes intercambiables predominantes son Ca^{2+} y Mg^{2+} , las partículas de arcilla no se expanden ni se repelen entre sí y se mantienen condiciones favorables de permeabilidad (Richards, 1985; Ortiz, 1992 y Ortega, 1993).

2.6. EFECTO DE LA CONCENTRACION DE SALES SOLUBLES DEL SUELO SOBRE LOS CULTIVOS

Durante mucho tiempo se ha considerado que la acumulación de sales produce aumento de la presión osmótica de la solución del suelo, haciendo difícil el abastecimiento de agua para las plantas; pero esta hipótesis no se ha probado y en contraposición se ha comprobado que las plantas realizan ajustes osmóticos en el jugo celular, en mayor o menor grado, lo que les permite extraer agua del suelo; por lo que se considera que el problema de salinidad no se genera por deficiencia de agua para las plantas (Pizarro, 1978; Richards, 1985).

Se han hecho otras consideraciones diciendo que el problema más bien se presenta debido a que algunas sales afectan las plantas en forma específica, pero es muy difícil distinguir los efectos, ya que depende de la concentración de las propiedades fisicoquímicas de las sales y de las propiedades biológicas y fisiológicas de las plantas. En general, el efecto de las sales sobre las plantas parece estar relacionado a la salinidad total, más que a la salinidad específica, producida por constituyentes específicos.

2.6.1. Reacción de las plantas a las sales solubles del suelo

De acuerdo a su reacción a la salinidad, las plantas pueden dividirse en dos grupos básicos: halófitas y glicófitas.

Las halófitas son plantas que se desarrollan en ecosistemas salinos adaptándose durante su ontogénesis, debido a las características y propiedades desarrolladas durante su proceso evolutivo en respuesta a las condiciones prevalecientes. El estudio de estas plantas ayuda a entender y considerar las

bases fisiológicas para determinar varios grados de tolerancia a las sales que presentan las plantas cultivadas, las cuales pertenecen en un alto porcentaje a las glicófitas.

Las glicófitas son plantas que se desarrollan en habitats no salinos y su desarrollo está limitado a su habilidad de adaptación a la salinidad durante su crecimiento individual, ya que las condiciones prevalecientes durante su evolución no favorecieron el desarrollo de propiedades para tolerar la salinidad (Pizarro, 1978 y Aceves, 1979).

2.6.2. Formas de adaptación de las halófitas a las sales

Algunas halófitas absorben cantidades pequeñas de sales, mientras que otras absorben cantidades muy altas. Acumulan sales en sus tejidos y mediante la regulación de su presión osmótica interna logran adaptarse a los suelos salinos. Debido a su gran capacidad de acumulación de sales, las halófitas tienen una presión osmótica muy elevada en su jugo celular, mayor que la fuerza de succión del suelo, lo que las capacita para absorber agua de los suelos salinos. Además pueden soportar presiones osmóticas de la solución del suelo aumentando su propio potencial osmótico. En ciertas halófitas el potencial osmótico se desarrolla principalmente debido a la acumulación en sus tejidos de sustancias orgánicas; en otras éste se desarrolla debido a la acumulación de sales del substrato salino.

Estudios de las formas de adaptación de las halófitas a los suelos salinos, han hecho posible distinguir cuatro grupos diferentes de plantas:

Las euhalófitas son plantas que acumulan sales en sus tejidos y son las más tolerantes a las sales.

Las crinohalófitas tienen glándulas excretoras que les permiten eliminar sales.

Las gliocolófitas son plantas con raíces selectivas a las sales, que dejan pasar sólo cierta cantidad y tipo de iones.

Las localófitas son plantas que localizan sales en estructuras especiales controlando su distribución dentro de los tejidos (Pizarro, 1978; Aceves, 1979; Ortiz, 1992). Aparentemente cada grupo biológico definido de halófitas, ha desarrollado durante su evolución propiedades que facilitan su adaptación a condiciones especiales determinadas por el contenido total de sales, del suelo, la naturaleza y tipo de las mismas y el balance de agua que prevalece en el hábitat.

2.6.3. Efecto de las sales sobre la germinación

Existen tres etapas en el proceso de germinación en las cuales las sales pueden tener influencia. Estas etapas son: etapa heterotrófica, etapa de transición y etapa autotrófica.

Bajo condiciones de salinidad, uno de los principales problemas es obtener un porcentaje adecuado. Estas condiciones deben considerarse, ya que si el porcentaje de germinación es bajo, el cultivo puede fracasar (Aceves, 1979; Porta *et al.*, 1999).

La tolerancia de los cultivos a concentraciones de sales durante la germinación, depende de la especie de la planta, de la concentración y tipo de sales.

2.6.4. Efecto de las sales sobre la absorción de nutrimentos

En la mayoría de los casos cuando se ha estudiado el efecto de las sales sobre el rendimiento de los cultivos, se ha considerado que todas las otras variables permanecen constantes y sólo se analiza la variación de los rendimientos como una función del contenido de sales en la solución del suelo.

El caso de los nutrimentos no es una excepción y los cultivos se han fertilizado adecuadamente para estudiar el efecto de las sales sobre el crecimiento. Las dudas han surgido al tratar de decidir si se debe aplicar fertilizantes en suelos salinos o no, y que efectos pueden producir a los cultivos el fertilizar o no fertilizar. Se sabe que los cultivos responden en diferente forma a la fertilización bajo condiciones de salinidad y la respuesta depende de la especie de la planta, del nivel de sales en el suelo, de la cantidad, tipo y forma de aplicación de los fertilizantes (Aceves, 1979; Porta *et al.*, 1999).

2.6.5. Tolerancia relativa de los cultivos a las sales y elementos tóxicos

Para mantener una agricultura próspera en suelos que contienen sales, existen dos alternativas, o se eliminan las sales mediante lavado del suelo, o se trata de establecer cultivos que mediante ciertas prácticas de manejo sean capaces de desarrollar bajo condiciones de salinidad y producir rendimientos satisfactorios.

En las zonas áridas y semiáridas, donde las sales son un problema serio en la agricultura bajo riego, el agua es un recurso escaso y difícilmente se puede contar con volúmenes disponibles para eliminar las sales del suelo mediante lavado; por lo que la segunda alternativa presenta más posibilidades, ya que bajo estas condiciones, el éxito o fracaso de la agricultura dependerá en alto grado de la selección del cultivo que mejor se adapte a las condiciones de salinidad existentes, lo cual resulta más factible cuando hay escasés de agua.

La tolerancia de los cultivos a las sales varía en un rango muy amplio, no únicamente de unas especies a otras, sino que en muchos casos para un mismo cultivo, dependiendo de su estado de desarrollo y de las prácticas de manejo. Prácticas de manejo adaptadas especialmente para condiciones de salinidad, pueden reducir notablemente el efecto de las sales sobre las plantas.

Un cultivo será más tolerante que otro, cuando en un nivel de salinidad dado su rendimiento es menos afectado por las sales (Aceves, 1979).

2.6.6. Tolerancia de los cultivos a elementos tóxicos y sodio intercambiable

Existen en el suelo ciertos elementos que a condiciones relativamente bajas son tóxicos para las plantas. Entre los más frecuentes se tiene al B, Cl y al Na, pero en algunos casos puede haber Li y Se en niveles tóxicos.

a) Cloruros

La acumulación excesiva de Cl⁻, causa daños a las hojas en árboles frutales como aguacate, almendro, papayo, zapote, mango, chirimoya, vid, nogal y cítricos. El nivel de acumulación de Cl⁻ en las hojas, al cual se desarrollan los síntomas de daño, no está bien definido, ya que hojas que muestran daños pueden tener una menor acumulación de Cl⁻ que hojas que no muestran daños. El mecanismo mediante el cual el Cl⁻ es tóxico no es aún conocido. Bernstein (1965) citado por Porta *et al.*, (1999), publicó un trabajo mencionando los niveles mínimos de acumulación de Cl⁻ en las hojas, a los cuales se presentan quemaduras

b) Sodio intercambiable

El sodio puede producir efectos directos e indirectos sobre los cultivos. Los efectos directos están ligados únicamente con el Na⁺ soluble, el cual al rebasar ciertas concentraciones es tóxico para las plantas; pero la presencia de Na⁺ en la solución del suelo, está íntimamente ligada con la presencia de Na⁺ intercambiable, existiendo un equilibrio dinámico entre los iones solubles y los intercambiables, que puede cambiar cuando cambia la concentración en la solución del suelo (Aceves, 1979; Ortega, 1993).

Los efectos indirectos del sodio sobre las plantas se presentan cuando se encuentra en el suelo en forma intercambiable, en porcentajes asociados con el deterioro de las características físicas del suelo. Dependiendo del tipo de suelo, el Na⁺ intercambiable puede iniciar el deterioro de las características físicas del mismo, en porcentajes que pueden variar de 5 a 25% y a estos porcentajes corresponden concentraciones de Na en solución que afectan sobre todo árboles frutales como aguacate, naranjo y nogal.

Los efectos indirectos del Na⁺ sobre las plantas, se deben a que cuando en un suelo dado se rebasa un cierto porcentaje de Na⁺ intercambiable, el suelo se vuelve impermeable al aire y al agua, se incrementa el pH de su solución a niveles tales que se tienen problemas de nutrición para las plantas, ya que muchos elementos se precipitan, como el Ca²⁺ y el Mg²⁺ en forma de carbonatos (CaCO₃ y MgCO₃).

2.6.7. Mecanismo mediante los cuales las plantas toleran altas concentraciones de sales

Existen dos niveles de "protección" contra las sales en las plantas:

- 1) **La raíz, donde hay cierta regulación de los iones que pueden penetrar a través del xilema.**
- 2) **En las partes aéreas de la planta y comprende la restricción de la movilidad de los iones, impidiendo su redistribución entre los órganos maduros.**
- 3) **Los que se encuentran en desarrollo.**

Estos niveles de "protección" pueden colapsar a nivel de la raíz, si la planta se sujeta a una demanda evapotranspirativa muy elevada, ya que el movimiento pasivo de los iones dentro del xilema se vuelve importante. En la parte aérea puede ocurrir cuando los iones inmóviles se translocan dentro de la planta.

El estudio de las halófitas ha producido información muy valiosa sobre los mecanismos mediante los cuales las plantas toleran altas concentraciones salinas y puede decirse que la variación en la capacidad de diferentes especies vegetales para tolerar sales, es una consecuencia de los siguientes mecanismos:

- a) **Exclusión de los iones a nivel radical.**
- b) **Retención de los iones en las vacuolas de las raíces en crecimiento.**
- c) **Retención de los iones dentro de la raíz y la parte aérea, que permite que las plantas toleren concentraciones extra celulares o celulares muy elevadas.**
- d) **Retraslocación de los iones a la raíz para su excreción hacia el medio.**
- e) **Capacidad de los compartimientos celulares de la hoja para tolerar altas concentraciones de solutos en las vacuolas de las células.**
- f) **Mantenimiento de un constante aumento del tamaño de los compartimientos celulares o extracelulares a través del aumento de la succulencia, dando como resultado una "dilución" de los iones en los compartimientos (Pizarro, 1978; Aceves, 1979).**

CAPÍTULO 3

CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR ELEMENTOS TÓXICOS

La contaminación puede definirse como: aporte de un elemento o de un compuesto químico desde el exterior del lugar, que provoca un aumento respecto a la concentración inicial, produciendo efectos desfavorables. La contaminación provoca una perturbación del suelo, que se traduce en una pérdida de calidad y aptitud para el uso o bien lo hace inutilizable, a no ser que se le someta a un tratamiento previo (Porta *et al.*, 1999; Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El suelo puede contener una gran variedad de elementos químicos, por lo que puede resultar difícil establecer a partir de qué momento, un mismo elemento deja de ser beneficioso o indiferente. Así mismo también resulta difícil precisar cuando deja de estar contaminado un suelo que está siendo objeto de un proceso de recuperación.

Suelo contaminado: Presenta uno o más elementos o productos químicos a elevadas concentraciones.

Terreno contaminado: Se establece bajo un régimen normativo determinado, cuando el daño ocurre o es probable que se produzca. Las disposiciones legales varían de unos países a otros.

La declaración de **terreno contaminado** dependerá del nivel de exigencia de la normativa legal existente, para una misma concentración de contaminante. En algunos países la legislación ambiental está más desarrollada que en otros, igual puede ocurrir entre comunidades autónomas o regiones contiguas (Porta *et al.*, 1999; Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

3.1. CONTAMINACIÓN POR ELEMENTOS TRAZA

En la naturaleza cada elemento tiene su ciclo biogeoquímico, que puede ser perturbado por la interacción de otros elementos, de forma natural o bien por aportaciones derivadas de actividades antrópicas. La interacción por aportes del mismo elemento puede conllevar que se alcancen concentraciones que supongan un riesgo actual o potencial de contaminación (Porta *et al.*, 1999).

Los ciclos biogeoquímicos desempeñan un importante papel en los procesos de intemperización, ya que son ellos los que liberan progresivamente los distintos elementos contenidos en los minerales constituyentes de las rocas. Unos elementos pasan a ser solubles y son susceptibles de ser translocados (empobrecimiento), mientras que otros permanecerán en el suelo, distribuidos en los distintos horizontes, a veces concentrándose (enriquecimiento absoluto o relativo), sin que se pueda hablar de contaminación en estos casos.

El origen geoquímico de un mismo elemento variará según el material originario (Fassbender, 1984; Kabata-Pendias y Pendias, 2001). Además el estudio de los distintos minerales pone de manifiesto cual puede ser su aporte en elementos al fondo geoquímico. Relacionados de acuerdo con la secuencia del intemperismo se obtiene información útil para interpretar posibles contaminaciones antrópicas, al poder o no atribuir la presencia y concentración de un determinado elemento a un mineral fuente (Fassbender, 1984).

Cuadro 3.1. Constitución química de algunos minerales primarios del suelo

Mineral primario	Elementos principales	Elementos asociados
Olivino	Mg, Fe, Si	Ni, Co, Mn, Li, Zn, Cu, Mo
Hornblenda	Mg, Fe, Ca, Al, Si	Ni, Co, Mn, Sc, Li, Zn, Cu, Ga, V
Augita	Ca, Mg, Al, Si	Ni, Co, Mn, Sc, Li, V, Zn, Pb, Cu, Ga
Biotita	K, Mg, Fe, Al, Si	Rb, Ba, Ni, Co, Sc, Li, Mn, V, Zn, Cu, Ga
Apatita	Ca, P, F	Pb, Sr, Cd
Anortita	Ca, Al, Si	Sr, Cu, Ga, Mn
Andesina	Ca, Na, Al, Si	Sr, Cu, Ga, Mn
Oligoclasa	Na, Ca, Al, Si	Cu, Ga
Albita	Na, Al, Si	Cu, Ga
Ortoclasa	K, Al, Si	Rb, Ba, Sr, Cu, Ga
Moscovita	K, Al, Si	F, Ru, Ba, Sr, Ga, V

Fuente: Porta *et al.*, 1999.

3.1.1. Distribución de los elementos traza a partir de la solución del suelo

La distribución de los elementos traza en la naturaleza (Fe, Cu, Mn, Zn) está condicionada por el origen geoquímico y por aportes antrópicos actuales o derivados de actividades contaminantes llevadas a cabo en el pasado.

La distribución de un contaminante en un suelo varía en función de la profundidad del horizonte, de la movilidad del elemento y de los procesos de traslocación habidos desde su llegada al suelo. Los elementos potencialmente contaminantes pueden hallarse en forma soluble, adsorbidos en forma intercambiable, fijados de forma irreversible, o precipitados. Los iones de la solución del suelo pueden formar un gran número de especies debido a reacciones de hidrólisis, complejación o redox, con efectos tóxicos marcadamente distintos (Porta *et al.*, 1999).

3.1.2. Riesgos derivados de la contaminación

En la terminología referente a la contaminación cabe distinguir tres conceptos (Bourrelier y Berthelin, 1998):

Toxicidad: propiedad o potencial de una sustancia química o material para producir daños (alteraciones en ciertas funciones) en sistemas biológicos. La toxicidad se manifiesta cuando la sustancia se introduce en el organismo. La toxicidad puede ser aguda, subaguda o crónica. En este último caso se debe a los efectos irreversibles a largo plazo por absorción de pequeñas dosis acumulativas.

Peligro: Naturaleza del efecto adverso provocado por el material tóxico.

Riesgo: Probabilidad de sufrir un efecto o pérdida resultante de circunstancias específicas.

La toxicología estudia los efectos de un contaminante en un organismo vivo, mediante la administración de distintas dosis del producto.

Las técnicas toxicológicas son las más frecuentemente utilizadas por ser las que permiten obtener resultados de forma más rápida a menor costo y en condiciones de laboratorio (Porta *et al.*, 1999; Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Los estudios de contaminación del suelo se pueden llevar a cabo por dos vías diferentes: realizando análisis químicos de los suelos o de las plantas, lo que puede permitir evaluar el nivel de contaminación de forma cuantitativa, o bien evaluando la respuesta de las plantas o de los microorganismos indicadores en un suelo que se supone contaminado (Farago, 1994; Paul y Douglas, 1975).

Para evaluar la respuesta de las plantas en un suelo contaminado puede introducirse un **índice de tolerancia**:

$$IT = \frac{C_c}{C_n}$$

C_c = crecimiento en un suelo contaminado
 C_n = crecimiento en un suelo normal

El uso de especies indicadoras puede proporcionar una información cualitativa de la contaminación. Entre los organismos más utilizados en este tipo de estudios se encuentran los líquenes.

3.1.3. Definición, distribución y fuente de metales pesados

Los metales pesados son elementos químicos que tienen una densidad mayor de 5 Mg·m⁻³ en su forma elemental, abarcando 38 elementos de los cuales se hace referencia a 10 metales que son usados y descargados por la industria; Cd, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn.

Son de importancia aquellos que pueden presentar un peligro potencial para plantas y animales; estos son Cd, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn. El término metal pesado es satisfactorio para aquellos metales que están involucrados en procesos bioquímicos y toxicológicos (Tiller, 1989).

Phipps (1981) definió a los metales pesados en función de su reactividad química y pueden ser reconocidos como elementos, que bajo condiciones biológicamente significativas se encuentran como cationes. Actuando como ácidos, los iones metálicos forman compuestos complejos con una amplia clase de ligandos tanto orgánicos como inorgánicos y estos complejos son las especies biológicamente activas.

Los metales pesados, que alteran la calidad de nuestro ambiente derivan de diferentes fuentes que pueden ser categorizados como aerosoles urbano-industriales, desperdicios líquidos y sólidos de animales y del hombre, industria minera y otros tipos de industria y químicos agrícolas (Díaz, 1999; Cajuste y Reggie, 2000).

3.1.3.1. Movilidad de los metales a través del perfil del suelo

La movilidad de los iones en el suelo, incluyendo la de los metales pesados, depende de las condiciones de humedad, la velocidad de desplazamiento de la humedad en el suelo, el potencial redox, el pH, la interacción con otros constituyentes de la solución y propiedades del suelo, así como la capacidad de intercambio catiónico, entre otras. En general la movilidad de los metales depende de una barrera geoquímica de acumulación. Todas estas variaciones pueden cambiar en distancias cortas y, por lo tanto, la concentración de metales está sujeta a variabilidad espacial y temporal (Streit y Stumm, 1993 citado por Flores *et al.*, 1999).

Dowdy y Volk, (1983) citado por Vazquez, (1999) mencionan que el movimiento de metales pesados al interior del suelo ocurre principalmente en la fase líquida, ya sea en forma catiónica o en forma de complejos solubles, por lo cual la intensidad de su movilización estará controlada por la distribución del metal entre la fase sólida y la solución del suelo. Las formas en que se produce el traslado de los metales desde el sitio de formación o de aplicación, son similares a las de cualquier otro elemento presente en la solución; estos es, se pueden desplazar ya sea por difusión, flujo de masas y por movimiento del metal unido a partículas a través de canales, fisuras o macroporos. La difusión es importante para el traslado a cortas distancias y el flujo se produce generalmente en dirección hacia la zona de raíces de los cultivos. El flujo de masas juega un papel más importante para el desplazamiento de los metales a grandes distancias.

Colombo *et al.*, (1998) indicaron los diferentes grados del movimiento del metal a lo largo del perfil del suelo, debido al transporte orgánico o a la existencia de grietas y canales dentro del suelo. La movilidad, retención y pérdida de elementos traza están controlados por la precipitación, complejación, adsorción y procesos de óxido-reducción. Entre los factores que afectan la solubilidad de los metales pesados en suelos contaminados, los sitios de intercambio reducen el movimiento de estos metales a través del suelo. Igualmente los óxidos, hidróxidos, así como los aluminosilicatos de rango corto proveen sitios de intercambio para la adsorción de los metales pesados.

La actividad biológica puede alterar la solubilidad de los metales en los suelos por causas que directa o indirectamente cambian el estado de oxidación de los metales (Mc Bride, 1989).

La distribución de los metales pesados en el perfil del suelo, así como su disponibilidad, está controlada por una serie de parámetros tales como las propiedades intrínsecas del metal y las características del suelo. La cantidad y calidad de sitios de adsorción, la concentración y tipo de complejantes orgánicos e inorgánicos, la composición catiónica y aniónica de la solución del suelo, circulación del agua y actividad microbiana, son factores que afectan el ambiente de los metales (Piccolo y Celano, 1992).

Sawhney *et al.*, (1994) citado por Vázquez, (1999) en un estudio sobre el lavado de metales pesados presentes en compostas de residuos sólidos municipales, reportan que aunque inicialmente se produce una alta tasa de lavado de metales, su cantidad tiende a disminuir paulatinamente hasta que se hace constante esa tasa. Las cantidades lixiviadas en todos los casos no superaron los límites permisibles para metales pesados en agua potable, por lo cual concluyen que la contaminación del manto acuífero a partir de los materiales empleados se puede despreciar debido a que los procesos que ocurren al interior del perfil del suelo impiden un aumento en la cantidad de metales lavados.

3.1.3.2. Formación de complejos metálicos en el suelo

En el suelo los metales pueden sufrir una serie de reacciones inorgánicas. Además, pueden estar sometidos a quelaciones y a transformaciones biológicas diversas. Está demostrado que los principios químicos básicos son aplicables a los coloides orgánicos del suelo y con ellos se puede explicar la formación de complejos metálicos.

Existen varios componentes orgánicos que tienen gran capacidad para ceder electrones en la formación de complejos metálicos, como son los carboxilatos, los alcóxidos, los enolatos, los fosfatos, etc. (Seoáñez *et al.*, 1999). Algunos factores influyen sobre la estabilidad de los complejos, entre los que se encuentran la carga y dimensiones del ión metálico, las repulsiones electrostáticas existentes entre los grupos de ligandos que ceden electrones, el carácter electronegativo de aquellos, y los factores ambientales generales.

Los complejos más estables son los derivados de los metales de transición o de los metales que les siguen inmediatamente en la clasificación periódica de los elementos.

La quelación, proceso por el cual los átomos del metal en disolución son captados por moléculas en forma de anillo, puede ser considerada como una variante de la formación de complejos. Los quelatos pueden formar complejos de gran estabilidad en función del número y tamaño de los anillos (a mayor número y menor tamaño más estabilidad).

El aumento de la temperatura produce una progresiva desestabilización de los quelatos (Mortvedt *et al.*, 1983).

3.1.4. Factores físicos y químicos que afectan la retención de los metales pesados

3.1.4.1. pH

El pH de la solución del suelo y de los grupos funcionales afecta la ionización y sitios de adsorción sobre la superficie del mineral. Los cambios en el pH afectan la especiación de los metales y pueden conducir a la formación de complejos con hidróxidos y carbonatos. Las fluctuaciones estacionales de pH pueden presentarse en el agua natural y en los sistemas suelo debido a las prácticas agrícolas (Petrovic *et al.*, 1999).

Es muy frecuente que la disponibilidad de los metales disminuya o que aumente la sorción cuando sube el pH del suelo. Esto puede ser debido a las precipitaciones de óxidos de Mn o de hidróxidos de metales pesados, a los efectos de la concentración de fosfatos y carbonatos en la solución del suelo, a la disolución y precipitación de los óxidos de Fe y Mn, o finalmente, al grado de sorción de los metales, por la materia orgánica y por los hidróxidos (Seoáñez *et al.*, 1999).

Un hecho que demuestra la influencia del pH sobre la solubilidad de los metales es que, cuando se vierten productos al suelo, como aguas o lodos residuales, la concentración y movilidad de los metales pesados se altera más de lo que cabría suponer si sólo actuara el simple contenido en metales. Si el pH desciende a causa de la nitrificación que se produce después de una aplicación, aparece en la solución del suelo una concentración de Mn muy superior a la que tendría que haber simplemente a causa del Mn existente en el vertido (Petrovic *et al.*, 1999).

Lo mismo se puede afirmar para otros metales, como el Zn o el Cu (Seoáñez *et al.*, 1999).

3.1.4.2. Materia orgánica

La materia orgánica puede ser considerada como el factor más importante que influye en la sorción y en la formación de complejos metálicos, con base en la capacidad de quelación de los componentes orgánicos. Se ha comprobado que los ácidos húmicos y fúlvicos tienen constantes de gran estabilidad para los metales, siendo los mayores responsables de la inmovilización de éstos por la materia orgánica, aunque no por ello dejan de formar ciertos compuestos metálicos solubles, sobre todo en soluciones diluidas.

Entre los componentes orgánicos con elevada capacidad para ceder electrones en la formación de complejos metálicos, podemos mencionar los carboxilos, los fosfatos inorgánicos, los alcóxidos, los enolatos, etc. Los enlaces que se forman con los metales pueden variar desde el iónico al covalente.

Las sustancias húmicas afectan fuertemente los procesos de sorción y desorción de los metales pesados las cuales influyen en su movilidad y biodisponibilidad (Petrovic *et al.*, 1999). Otra característica importante que controla la movilidad de los metales en el suelo es la concentración de ligandos complejantes disueltos, especialmente ácidos húmicos y ácidos fúlvicos. La estructura de estos compuestos contiene una gran proporción de núcleos aromáticos con -OH, -COOH y otros grupos ricos en oxígeno fijados a ellos. Las

substancias húmicas están entre los más importantes agentes complejantes en agua intersticial del suelo y sedimentos Thurman, (1986) citado por Petrovic *et al.*, (1999).

Además de las sustancias húmicas, existen, otros productos capaces de formar complejos metálicos. Estos productos son de bajo peso molecular y pueden complejar al solubilizar los metales. Se presentan en cantidades variables y su composición es diversa; suelen proceder de exudados o de secreciones de las raíces vegetales, o de los propios microorganismos del suelo (Seoáñez *et al.*, 1999).

La concentración de carbono orgánico es uno de los factores más importantes involucrados en la solubilización y subsecuente migración de los metales a través del suelo (Bourg, 1995 citado por Morquecho, 1997). La materia orgánica adsorbe cantidades considerables de cationes inorgánicos (Boekhold y Van der Zee, 1992). Sin embargo, su efectividad para adsorber metales depende de sus propiedades de quelación (Petruzzelli *et al.*, 1978).

Los metales pesados fácilmente móviles, como Zn y Cd, generalmente están unidos a compuestos orgánicos, lo mismo que Cu y Mo (Kabata-Pendias y Pendias, 2001). Estas uniones son importantes en la transferencia de estos elementos a los sistemas biológicos, ya que los sustratos orgánicos están involucrados en los procesos metabólicos y por tanto podrían constituir los principales acarreadores para que los metales sean transferidos dentro de la cadena trófica (Förstner, 1995). El Co forma complejos orgánicos, principalmente con ácidos fúlvicos, de esta manera es móvil durante un corto período. Estas asociaciones son inestables y no pueden migrar grandes distancias (Bourg, 1995).

3.1.4.3. Textura

Las variaciones en textura, composición y mineralogía del sedimento pueden ser usadas para diagnosticar propiedades en la identificación de la fuente del material y la historia de su transporte. Así, el sedimento con alto contenido de arcilla tipo montmorillonita es químicamente activo y actúa como depósito de nutrientes y metales pesados (Vaithyanatha *et al.*, 1992 citado por Morquecho 1997).

Los sedimentos arcillosos contienen mayores cantidades de metales pesados que los arenosos. Esto se relaciona con un incremento general en la concentración de metales pesados de las fracciones gruesas a las finas. Los elementos de Fe, Mn, Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, Co y As se presentan principalmente en partículas menores de 20 μm , con una concentración aproximadamente 50% más alta que en fracciones de sedimentos gruesos y arena (Saeki *et al.*, 1993). El aumento en la concentración de metales en el sedimento fino se debe al incremento del área superficial específica y las propiedades superficiales de los minerales de arcilla. La concentración y relación entre elementos, refleja la composición mineralógica de fracciones con diferente tamaño de partícula.

El contenido de Fe y Mn se correlaciona con el contenido de arcilla, mientras que esta fracción es relativamente poco importante para la sorción de Co en el suelo (McLaren *et al.*, 1986).

3.1.4.4. Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico es la propiedad de los minerales de arcilla y la materia orgánica para adsorber cationes de la fase líquida del suelo, desadsorbiendo al mismo tiempo, cantidades equivalentes de otros cationes. Determina el papel del suelo como depurador natural, al permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo (Porta *et al.*, 1999). Por ejemplo, para Cd se ha determinado que existe un efecto directo de la capacidad de intercambio catiónico sobre la adsorción de este elemento (Basta *et al.*, 1993).

Por otra parte, Miller y McFee (1983) reportan que al disminuir los sitios en el complejo de intercambio aumenta la concentración de metales pesados a través de procesos de absorción.

3.2. INFLUENCIA DE LOS METALES PESADOS EN EL DESARROLLO DE LOS VEGETALES

El destino metabólico y el papel de cada elemento traza en las plantas puede estar caracterizado en relación a algunos procesos básicos como:

- 1. Absorción y transporte dentro de la planta**
- 2. Procesos metabólicos**
- 3. Concentraciones y formas de ocurrencia**
- 4. Deficiencia y toxicidad**
- 5. Competencia e interacción**

Las plantas que se encuentran en un estado fisiológico pobre presentan de ordinario un aumento de la sensibilidad frente a las sustancias tóxicas. Cualquier cosa que perturbe drásticamente el metabolismo de la célula vegetal, tiende a desencadenar la producción de compuestos aromáticos como mono y dihidrofenoles, glucósidos fenólicos, flavonoides, antocianinas, aminoácidos aromáticos y derivados de la curamina. Estos compuestos protegen la planta de las infecciones bacterianas o fúngicas.

La exposición de las células vegetales a las sustancias tóxicas, o incluso a iones de algunos metales pesados, puede inducir la formación de fitoalexinas. Las fitoalexinas son sustancias producidas frecuentemente por las células vegetales después de la infección y que protegen de una infección ulterior mediante una acción antibiótica no específica. Varían químicamente pero son a menudo compuestos fenólicos con múltiples estructuras anulares. Finalmente, las lesiones producidas en el metabolismo de las células en ciertas partes de la planta pueden estimular la translocación de materiales hasta las células (Farago, 1994; Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

3.2.1. Absorción

En general, las plantas toman fácilmente las diferentes especies de elementos traza que están disueltos en la solución del suelo en forma iónica, quelatada o compleja.

La absorción puede resumirse como sigue:

- 1. Generalmente opera a muy bajas concentraciones en las soluciones.**
- 2. Depende de las concentraciones en las soluciones, especialmente a rangos muy bajos.**
- 3. La proporción depende de la presencia de H⁺ y otros iones.**
- 4. La intensidad varía con la especie vegetal y etapa de desarrollo.**
- 5. Los procesos son sensibles a algunas propiedades del ambiente del suelo, como la temperatura, aereación y potencial redox.**
- 6. Puede ser selectivo para un ión particular.**
- 7. La acumulación de algunos iones puede tomar lugar a través de un gradiente de concentración.**
- 8. Las micorrizas juegan un papel importante en el ciclo entre el medio externo y las raíces. (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).**

3.2.1.1. Absorción por raíz

La absorción de los elementos traza por las raíces puede ser pasivo (no metabólico) y activo (metabólico). La absorción pasiva es la difusión de los iones de la solución externa dentro de la endodermis de la raíz. La absorción activa requiere energía metabólica y toma lugar a través de un gradiente químico.

Muchas evidencias indican que las raíces presentan una gran actividad en la movilización de elementos traza que están unidos por varios constituyentes del suelo (Farago, 1994).

Los elementos traza más fácilmente disponibles para las plantas son en general, los que están adsorbidos por los minerales arcillosos, (especialmente, montmorillonita e illita), durante un tiempo éstos están fijados por los óxidos y unidos a los microorganismos que son mucho menos fácilmente disponibles (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Los mecanismos de absorción de elementos traza por las raíces involucra varios procesos:

- 1. Intercambio catiónico por las raíces**
- 2. Transporte en el interior de las células por agentes quelantes u otros transportadores**
- 3. Efecto de la rizósfera**

Los cambios en el pH en el ambiente de la raíz, pueden jugar un papel especialmente importante en la disponibilidad de ciertos elementos traza (Farago, 1994; Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Las raíces de arroz, presentan un mecanismo peculiar para absorber Si y Se en la forma de óxidos. La habilidad de diferentes plantas para absorber elementos traza varía grandemente. Algunos elementos tales como Cd, B, Br, Cs y Rb son fácilmente absorbidos, mientras que el Ba, Ti, Zr, Se, Bi, Ga y hasta cierto punto el Fe y Se son lentamente disponibles para las plantas.

3.2.1.2. Absorción foliar

La biodisponibilidad de elementos traza de fuentes aéreas a través de las hojas puede tener un impacto significativo sobre la contaminación de las plantas, como es el caso de aplicaciones foliares especialmente de elementos tales como el Fe, Mn, Zn y Cu.

La absorción foliar consiste de 2 fases: penetración cuticular no metabólica la cual es considerada generalmente por ser la mayor ruta de acceso y los mecanismos metabólicos, las cuales se consideran por la acumulación de elementos a través de un gradiente de concentración. El segundo proceso es responsable para el transporte de iones a través de la membrana plasmática y dentro del protoplasto de la célula (Farago, 1994).

Los elementos traza tomados por las hojas pueden ser translocados a otros tejidos de la planta, incluyendo las raíces donde el exceso de algunos metales son almacenados. La proporción de elementos traza que se mueven entre los tejidos varía grandemente, dependiendo del órgano de la planta, edad, y elemento involucrado.

Una fracción de metales pesados absorbidos por las hojas puede lixiviarse a través del follaje por toda la planta, por el agua de lluvia. Las diferencias de lixiviación de los elementos traza pueden estar relacionados a su función o asociación metabólica. Por ejemplo la facilidad del traslado del Pb por lavado sugiere que el metal tuvo una depositación superficial sobre la hoja.

En la lixiviación o arrastre foliar por el agua de lluvia puede involucrarse en los procesos de intercambio, en el cual el H⁺ del agua reemplaza los elementos retenidos en los sitios de absorción en la cutícula de la hoja (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

3.2.2. Biodisponibilidad

Los métodos más seguros para diagnosticar la disponibilidad de los elementos traza se basan en las concentraciones de los elementos en las soluciones del suelo. Diferentes métodos han sido presentados por muchos autores, los más comúnmente usados se basan sobre los agentes complejantes específicos o extractantes ácidos para un elemento dado. Muchos trabajos han sido realizados con extractantes universales para las pruebas de suelos y evaluar la disponibilidad de micronutrientes.

Las propiedades específicas de las plantas son muy significativas en determinar la biodisponibilidad de elementos traza y son totalmente variables con los cambios del suelo y condiciones de las plantas. Existen pruebas en suelos y plantas, sin embargo no son satisfactorias para predecir las deficiencias de elementos traza en plantas de cultivo que responderían a la aplicación de micronutrientes (Farago, 1994).

3.3. FORMAS EN EL SUELO, EN LA PLANTA Y FUNCIONES DE LOS METALES TRAZA Y METALES PESADOS

3.3.1 Fierro

3.3.1.1. Formas en el suelo

El Fe está situado en tercer lugar en cuanto a abundancia entre los elementos minerales de la corteza terrestre, después del Si y el Al.

El Fe es un elemento cuyo estado en el suelo informa mejor sobre la edafogénesis, por ejemplo, el grado de hidratación de los óxidos de Fe, del cual depende el color, suministra información sobre el microclima del suelo; así como el estado reducido de las sales de Fe, que dan al suelo un color gris verdoso, indicando insuficiencia de aireación.

El Fe también interviene en la estructura de los suelos, favoreciendo con frecuencia estructuras muy estables, aún en medio ácido, a condición de que la aireación sea suficiente y que el Fe se halle en estado Fe^{3+} .

El Fe puede encontrarse en el suelo en formas más o menos solubles, o fácilmente móviles. Las formas móviles son la forma de intercambio, con mucha frecuencia ferrosas. La forma inmóvil es siempre férrica, ligada al complejo humicoarcilloso o precipitada después de una movilización más o menos transitoria.

Entre las formas solubles o de cambio se encuentra el Fe^{2+} , que sólo existe en medio reductor y suficientemente rico en materia orgánica; la acidez favorece esta reducción y solubilización del Fe.

La materia orgánica soluble procedente de la hojarasca forma con el hierro complejos seudosolubles que impiden su precipitación en medio aireado y a pH con frecuencia del orden de 4. La complejación del Fe tiene lugar, preferentemente en forma reducida (Fe^{2+}) formándose entonces un anión complejo muy estable, resistente a modificaciones de pH. El Fe se puede complejar igualmente en forma férrica, siendo ésta menos estable que la ferrosa porque puede ser fácilmente precipitada mediante una elevación del pH o un aumento de la concentración del ión Ca^{2+} o del CO_3^{2-} .

El Fe^{3+} insoluble se presenta en dos formas de origen diferente: 1) la forma englobada en el complejo humicoarcilloso en los horizontes A1 de los suelos con humus mull y 2) la forma precipitada en los horizontes de acumulación, después de la emigración en suelos con humus mor. Los Fe_2O_3 forman alrededor

de las arcillas una película que sirve de enlace iónico entre la arcilla y el humus en el complejo húmicoarcilloso. El Fe dispuesto en la capa pelicular alrededor de las arcillas da al complejo su color propio: pardo en forma hidratada en climas húmedos o rojo en forma poco hidratada o deshidratada en climas cálidos y secos. En cambio, las formas ocluidas en las moléculas del humus y de las arcillas no intervienen en la coloración del suelo (Duchaufour, 1978).

3.3.1.2. Formas y funciones en la planta

La cantidad de Fe disponible en los suelos para las plantas depende grandemente del pH del suelo y del potencial de óxido-reducción. En suelos ácidos el Fe está normalmente en formas ferrosas (Fe^{2+}) que son asimilables por las plantas, pero en suelos neutros o alcalinos se oxida pasando a Fe^{3+} que puede llegar a ser muy insoluble.

El potencial de oxidación crece al aumentar el pH y la aireación, de modo que debido a estos dos factores es probable que avance hacia Fe^{3+} y hacia la disminución de la disponibilidad del Fe^{2+} .

En la nutrición de las plantas, el Fe desempeña un papel múltiple. Es un componente estrechamente unido a un grupo de proteínas que incluye el sistema de citocromos, la catalasa y la peroxidasa. Su distribución en los tejidos de la planta y en las partes de la célula es muy variada. La deficiencia de Fe inhibe la división celular y la producción de hojas primordiales. El Fe puede participar en alguna reacción de la fotosíntesis, pero su papel en la síntesis de la clorofila no es muy claro todavía, aunque se ha encontrado que existe una correlación entre el contenido de clorofila de las hojas y su contenido en Fe.

El Fe es moderadamente móvil en las plantas. El contenido de Fe en los tejidos normales de las plantas varía desde 25 a más de 500 mg kg^{-1} dependiendo de la parte de la planta y de la especie. Algunas especies de hortalizas como la espinaca, la lechuga, el colirrábano, el brócoli y la col verde son ricas en Fe, conteniendo de 100 a 800 mg kg^{-1} en materia seca. Las plantas leguminosas normalmente contienen más Fe que las gramíneas.

El contenido de Fe puede variar desde 20 a 740 mg kg^{-1} en las hojas de los árboles frutales y de 50 a 420 mg kg^{-1} en las hojas de los árboles caducifolios y de las coníferas. Debido a la movilidad parcial del Fe en las plantas, existen considerables diferencias en su contenido en las distintas partes de la planta. En el maíz, por ejemplo, el Fe puede estar precipitado en los nudos de los tallos o en su proximidad, siendo imposible su traslado a las hojas, donde es necesario, con lo cual la planta sufre la deficiencia (Sillanpää, 1976 citado por Flores, 1987).

3.3.2. Cobre

3.3.2.1. Formas en el suelo

El Cu se presenta en los suelos principalmente como ión Cu^{2+} adsorbido en los minerales arcillosos y/o ligado por la materia orgánica. A este respecto, los experimentos realizados por Sanders y Bloomfield (1980) y McLaren *et al.*, (1981) demuestran que la materia orgánica es el factor principalmente responsable de la adsorción del Cu por los suelos, sugiriendo que el pH no afecta marcadamente la adsorción del Cu sobre la materia orgánica ya sea soluble e insoluble. Estos mismos autores encuentran, además que hay una adsorción específica sobre óxidos de Fe y Mn. Se sabe que el Cu puede combinarse fácilmente con cualquier sustancia libre capaz de formar iones complejos que puedan estar disponibles o no para las plantas. Se ha demostrado que cuando se añaden pequeñas cantidades de Cu al suelo, el elemento se encuentra disponible más fácilmente en suelos ricos en materia orgánica que en suelos minerales.

Otro de los factores que influyen sobre la disponibilidad del Cu es el pH del suelo. La solubilidad del Cu en el suelo disminuye ligeramente al variar el pH de ácido a neutro y a la gama de alcalinidad. Normalmente, el Cu soluble no se incrementa en forma apreciable hasta que el pH cae por debajo de 5.0. En suelos orgánicos muy ácidos que se han alcalinizado en diversas magnitudes, se han obtenido óptimos resultados con pH de 5.5.

En los estudios realizados por Dhillon *et al.*, (1981) se intentaba observar la adsorción del Cu en suelos alcalinos de la India, pero los resultados llevaron a la conclusión de que el elemento había sufrido precipitación como $\text{Cu}(\text{OH})_2$ o CuCO_3 . La capacidad de adsorción de los suelos estaba relacionada con la capacidad de intercambio catiónico, con el contenido de arcilla y con el CaCO_3 equivalente.

La concentración de Cu extraído mediante extractantes químicos varía según el pH del suelo más que de las cantidades extraídas por las plantas. Con valores de pH elevado se han encontrado niveles excesivos de Cu que pueden pasar a formar minerales de baja solubilidad (Mortvedt *et al.*, 1983).

Rango promedio en el mundo de Cu en el suelo = 6 a 80 mg kg^{-1}

3.3.2.2. Formas y funciones en la planta

El Cu desempeña un papel esencial en el crecimiento de las plantas, ya sea como activador o como parte de muchas enzimas oxidantes tales como la mono y polifenol oxidasa y la oxidasa del ácido ascórbico, que intervienen en la respiración.

También el Cu es importante en el metabolismo de las proteínas y puede estar relacionado con la formación de la clorofila. Este papel metabólico esencial del Cu queda bien establecido, además, por el hecho de que la citocromo oxidasa contiene Cu, además de Fe.

El color y número de esporas, así como el peso del micelio de *Apergillus niger* son sensibles al nivel de Cu en el medio. Los niveles de Cu en el suelos se ven afectados por el metabolismo de la microflora,

de manera que puede verse disminuida la concentración de este elemento en forma soluble durante la descomposición de algunos residuos vegetales; o aumentar dicha concentración mediante la oxidación de los iones sulfuro o ferroso de minerales como la calcopirita (CuFeS_2) dejando libres iones de Cu en el medio. Esta oxidación es llevada a cabo por bacterias del género *Thiobacillus* (Alexander, 1980).

Generalmente, cuando se produce una deficiencia de Cu, ésta se corrige aplicando al suelo o al follaje alguna sal de Cu en forma soluble o ligeramente soluble. La sal que se utiliza más comúnmente es el $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Las concentraciones normales de Cu en la mayoría de las plantas suelen estar entre 5 y 25 mg kg^{-1} . Pero estas concentraciones varían de acuerdo con las partes de la planta y con las especies, estado de madurez y otros factores (Chapman y Pratt, 1973).

3.3.3. Manganeso

3.3.3.1. Formas en el suelo

En general, el Mn es suficientemente móvil en el suelo. En suelos fuertemente reductores se podría esperar encontrar el elemento como Mn^{2+} adsorbido, pero en suelos alcalinos parte del Mn podría formar MnCO_3 . En la solución del suelo la mayoría del Mn se encuentra presente en forma de complejos más que como un ión simple.

El Mn, existe en el suelo en muchas formas, la mayoría de ellas más o menos oxidadas, siendo más solubles y más asimilables las formas divalentes. Al igual que el Fe, la acidez del suelo favorece la evolución del Mn hacia sus formas móviles, mientras que los pH elevados favorecen su insolubilización.

La forma iónica cambiante Mn^{2+} se halla en equilibrio con las formas solubles y muy móviles. Esta forma iónica del Mn al igual que el Fe^{2+} , sólo existen en los suelos con débil potencial de óxido-reducción y muy ácidos (Hem, 1965).

La forma de Mn intercambiable, que es relativamente soluble, es el MnO retenida por el complejo húmicoarcilloso.

Las formas insolubles y no cambiables son los óxidos Mn_2O_3 y MnO_2 . La forma tetravalente o pirolusita es una forma estable y difícil de reducir; pero la trivalente es inestable y puede reducirse parcialmente y pasar a la forma de cambio. Las complejidades del Mn se deben al hecho de que éste existe en varios estados de oxidación y forma óxidos no estequiométricos con estados de valencia mezclados. Sus óxidos también existen en diferentes estados cristalinos y amorfos.

Las especies de MnSO_4 , y $\text{Mn}(\text{HCO}_3)_2$ contribuyen ligeramente al Mn soluble total en suelos. Los cambios normales en los niveles de O_2 , CO_2 , y SiO_2 , que ocurren en suelos bien aireados, causan pequeños cambios en la solubilidad de los compuestos de Mn (Lindsay, *In: Mortvedt et al.*, 1983). La solubilización del Mn tiene lugar en medio ácido y reductor. Igual que como ocurre con el Fe, las sustancias húmicas solubles que complejan al ión Mn^{2+} tienen un papel importante en la conservación de su forma soluble; en suelos con

buen drenaje el ión Mn^{2+} puede ser lavado, mientras que en suelos mal drenados (hidromorfos) se puede acumular pudiendo llegar a tener una acción tóxica.

La precipitación del Mn puede ocurrir generalmente de dos formas: en algunos suelos ácidos que pasan por fases de hidromorfía temporal (seudogley) y desecación, la precipitación ocurre en este período seco mediante una oxidación, precipita al mismo tiempo que el Fe, formando concreciones negras ferromangánicas. Otro factor de precipitación es el aumento de pH que cataliza la oxidación del Mn^{2+} , esta precipitación se presenta a menudo como consecuencia de un encalado excesivo (Jarvis, 1984).

La forma tetravalente es muy probable que se encuentre en suelos alcalinos, la forma trivalente probablemente está favorecida por valores de pH del suelo próximos a la neutralidad y la forma divalente se encuentra en suelos ácidos.

Varios experimentos de campo han demostrado que existe una relación entre la disponibilidad del Mn y el pH del suelo, pareciendo que los valores de pH situados entre 6 y 6.5 son críticos. Los valores inferiores a estas cifras favorecen la reducción y los valores superiores, la oxidación.

Rango promedio en el mundo de Mn en el suelo = 80 a 1 300 mg kg⁻¹

3.3.3.2. Formas y funciones en la planta

La mayoría de los investigadores afirman que las plantas pueden utilizar con toda seguridad el Mn divalente y es casi seguro que no pueden utilizar el Mn tetravalente. Se desconoce aún la capacidad de las plantas para absorber cualquier proporción apreciable de Mn en la forma trivalente. Uno de los factores que afecta la disponibilidad del Mn para las plantas es la materia orgánica de los suelos. En muchos países se ha encontrado que la deficiencia de Mn está asociada con las turbas, especialmente las que se encuentran sobre materiales calcáreos.

El Mn desempeña diversas funciones en las plantas. Es esencial para la fotosíntesis y actúa como un agente catalítico en la reducción del NO_3 , donde puede ser reemplazado por el Fe. También actúa como catalizador de reacciones de descarboxilación e hidrólisis. Cuando las plantas sufren una deficiencia de Mn, su actividad fotosintética disminuye. Por otra parte, la presencia de un exceso de Mn origina en las plantas un desequilibrio nutritivo, que se manifiesta con los mismos síntomas de la deficiencia del Fe. (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El Mn es un constituyente de algunas enzimas respiratorias y de otras enzimas responsables de la síntesis de las proteínas. Ciertas pruebas indican que el elemento interviene en la activación de varias enzimas como peptidasa, fosfatasas, arginasa, carboxilasa, colinestearasa (Tamhane *et al.*, 1978; Farago, 1994).

3.3.4. Zinc

3.3.4.1. Formas en el suelo

La solubilidad del Zn^{2+} es altamente dependiente del pH. A valores bajos de pH, parte del Zn^{2+} puede estar presente en el complejo de intercambio de los suelos, pero a valores de pH superiores, el nivel de Zn^{2+} en solución es tan bajo que muy poco Zn puede ser mantenido en el complejo de intercambio. Con valores de pH por debajo de 7.7, la especie predominante es el Zn^{2+} y a valores superiores a este pH lo que predomina es la especie neutra $Zn(OH)_2$. El $ZnCO_3$ y el $Zn(OH)_2$ son mucho más solubles que los complejos de Zn en el suelo, los cuales son los responsables de la estabilización del Zn en la mayoría de los suelos.

Los diversos agentes quelantes difieren mucho en su capacidad para quelar el Zn^{2+} en suelos. Sin embargo, en la escala de pH de los suelos calcáreos el DTPA es el agente quelante de mayor efectividad. A valores de pH ligeramente ácidos, el agente quelante más efectivo es el HEDTA.

Las deficiencias de Zn han sido acentuadas en suelos orgánicos alcalinizados, aunque el pH del suelo fuese menor de 6.0; probablemente debido a que el Zn fue fijado en la superficie de las partículas de $CaCO_3$ que no habían reaccionado.

Las condiciones del suelo asociadas con deficiencias de Zn son muy variadas. Los suelos calcáreos, orgánicos y muy a menudo suelos nivelados por máquinas o regados por inundación, propician con mucha frecuencia la deficiencia de Zn. Algunas de las condiciones que aparentemente han eliminado la deficiencia de zinc, incluyen grandes cantidades de $CaCO_3$ libre, bajos niveles de materia orgánica en suelos minerales y la nivelación de la tierra para irrigación.

Otro factor del suelo que aparentemente puede afectar la disponibilidad del Zn es la temperatura del mismo. El contenido total registrado en los suelos varía normalmente de 10 a 300 ppm. La deficiencia de Zn se da en una amplia variedad de texturas de suelos, pero con más frecuencia en los arenosos. Puede llegar a producirse toxicidad de Zn si se acidifican los suelos para aumentar la disponibilidad de otros elementos o si se hacen fertilizaciones muy prolongadas con Zn.

Rango promedio en el mundo de Zn en el suelo = 17 a 125 mg kg^{-1}

3.3.4.2. Formas y funciones en la planta

El contenido de Zn en las plantas varía normalmente entre 20 y 100 ppm de materia seca, pero fluctúa con la especie de planta y con las partes de ésta, también influye la época de madurez de la planta, la naturaleza del suelo en que ha crecido, las condiciones climáticas y, la fertilización con Zn. La importancia del Zn para las plantas se debe al hecho de ser un constituyente de numerosas enzimas como deshidrogenasas, proteinasas y peptidasas. También interviene en la síntesis del triptofano que es el precursor de las auxinas tales como el ácido indoloacético (Tamhane *et al.*, 1978).

Existen varios informes acerca de la disminución en los niveles de ARN y contenido de ribosomas en las células causada por la deficiencia de Zn (Price, *In: Mortvedt et al.*, 1983). Fortun *et al.*, (1983) realizaron un experimento para observar la influencia del ácido húmico sobre la nutrición mineral en plantas de maíz. Estos autores encontraron que la adición de ácido húmico a soluciones nutritivas normales, favoreció la traslocación de N y del P, también se encontró un incremento en la asimilación del Fe y del Zn, lo que dio lugar a un aumento en el rendimiento.

3.3.5. Plomo

3.3.5.1. Formas en el suelo

Nriago (1978) reportó que el promedio de Pb en suelos no contaminados es de 17 mg kg⁻¹ y Ure y Berrow (1982) reportaron 29 mg kg⁻¹. En suelos de Wales e Inglaterra en los primeros 15 cm de profundidad se reportó entre 15 y 106 mg kg⁻¹ con una media de 42 mg kg⁻¹. La media geométrica de muestras minerales fue de 13 mg kg⁻¹ y de muestras orgánicas fue de 30 mg kg⁻¹. En general los contenidos de Pb están en el rango de 10 a 30 mg kg⁻¹, y en bajos niveles de contaminación de 30 a 100 mg kg⁻¹. El PbHAsO₄ ha sido aplicado en arboles frutales para el control de insectos y los suelos pueden contener concentraciones elevadas de Pb (Frank *et al.*, 1976) y Merry *et al.*, 1983 citado por Alloway (1992).

El Pb se acumula naturalmente en los horizontes superficiales del suelo. Hay un fuerte enriquecimiento de Pb en los suelos provenientes de rocas silíceas. Los principales sitios del Pb en el suelo son: la solución del suelo, superficies de adsorción de los complejos de intercambio de arcilla-humus, formas precipitadas, óxidos de Fe y Mn y carbonatos alcalinos, el humus del suelo y celdas de aluminio-silicatos.

De un estudio estadístico Zimdahl y Koeppe (1977) citado por Alloway (1992) concluyeron que el pH y la capacidad de intercambio catiónico fueron las principales propiedades involucradas en la inmovilización del Pb, mientras que la materia orgánica fue la más importante en los procesos de precipitación como carbonatos o la adsorción por óxidos hidratados. Petrovic *et al.*, (1999), reportaron que el humus del suelo, especialmente ácidos húmicos de alto peso molecular, contribuyeron más en la inmovilización del Pb agregado al suelo y que el Pb fue enlazado por enlaces de coordinación por un par de electrones libres.

Rango promedio en el mundo de Pb en el suelo = 10 a 84 mg kg⁻¹

3.3.5.2. Formas y funciones en la planta

Aunque el Pb se presenta en forma natural en todas las plantas, no se demostró que sea esencial para su metabolismo. Broyer *et al.*, (1972) citado por Kabata-Pendias y Pendias (2001) concluyeron que si el Pb es necesario para las plantas su nivel de concentración entre 2 a 6 ppb podría ser suficiente.

Zimdahl (1975) y Hughes *et al.*, (1980) citado por Kabata-Pendias y Pendias (2001), descubrieron que la absorción del Pb por las raíces es pasiva y la relación de absorción se ve reducida por el enclavado y

por las bajas temperaturas. Aunque el Pb no es realmente soluble en los suelos, se absorbe principalmente por las raíces y es almacenado en las paredes celulares. El contenido de Pb en las plantas que se desarrollan sobre áreas mineralizadas, en general está altamente correlacionado con la concentración de Pb en el suelo, aunque sus relaciones difieren entre los órganos de las plantas (Warren, 1978 y Kovalevski, 1979), citado por Kabata-Pendias y Pendias 2001).

Cuando el Pb está presente en formas solubles, las raíces son capaces de tomar grandes cantidades de este metal, esta relación aumenta con el aumento de la concentración en las soluciones y con el tiempo.

Zimdahl y Koeppel (1977), citaron una hipótesis alterna para explicar la captación de Pb directamente del suelo, en la que explica que el Pb no es tomado directamente del suelo por las raíces de las plantas, sino más bien es absorbido de materiales vegetales muertos (y que están en proceso de descomposición) acumulados cerca de la superficie del suelo. Sin embargo, hay mucha evidencia de que el Pb es tomado del suelo por las raíces, en diferentes concentraciones, y que este proceso está fuertemente gobernado por factores del suelo y de la planta.

Existe mucha controversia en la literatura de cómo el Pb del aire es fijado en la cutícula cubierta de pelo o encerada de las hojas y como el Pb es tomado dentro de las células foliares. Numerosos estudios también han demostrado que el Pb depositado sobre la superficie de la hoja es absorbido por las células.

Los procesos responsables de la acumulación de Pb en los tejidos de raíz es la deposición de Pb, especialmente como pirofosfato de Pb a lo largo de las paredes celulares. (Malone *et al.*, 1974 citado por Kabata-Pendias y Pendias 2001), identificaron depósitos de Pb en la superficie de las paredes celulares del Plasmalemma en forma precipitada y en cristales. Contenidos similares de Pb observados en raíces, tallos y hojas sugieren que el Pb es transportado y depositado de igual manera en los tejidos de la planta. Aunque no hay evidencia de que el Pb sea esencial para el crecimiento de algunas especies vegetales, hay muchos reportes de los efectos estimulantes sobre el crecimiento de plantas de algunas sales de Pb (principalmente $Pb(NO_3)_2$ a bajas concentraciones). Por otra parte se han visto algunos efectos inhibitorios en el metabolismo vegetal a bajos niveles de Pb.

Existen algunos reportes que describen los efectos tóxicos del Pb en los procesos tales como: fotosíntesis, mitosis y absorción de agua; sin embargo los síntomas tóxicos en plantas no son muy específicos.

Los efectos subcelulares del Pb en tejidos vegetales está relacionada a la inhibición de las respiración y fotosíntesis debido al deterioro de las reacciones de transferencia de electrones; específicamente en mitocondrias de maíz con 1 ppm de Pb. Los procesos de fotosíntesis en hojas de girasol se redujeron a la mitad debido a la concentración de Pb de alrededor de $1\mu M g^{-1}$ (Rotfe *et al.*, 1975 citado por Kabata-Pendias y Pendias 2001).

3.3.6. Niquel

3.3.6.1. Formas en el suelo

En los horizontes superficiales el Ni se presenta en formas ligadas con compuestos orgánicos, de las cuales solo una parte puede ser fácilmente soluble. Sin embargo, (Norrish 1975 *In*: Kabata-Pendias y Pendias, 2001), dio a conocer que una fracción de Ni en el suelo se encuentra en los óxidos de Fe y Mn, y se ha visto que es la forma más disponible para las plantas.

La distribución en los perfiles de suelo está relacionada con la materia orgánica, óxidos amorfos y la arcilla, dependiendo de los tipos de suelos. Las concentraciones de Ni en horizontes superficiales de diferentes suelos varían de 3 a 25 $\mu\text{g l}^{-1}$ en los límites y en el centro del área afectada, respectivamente (Anderson *et al.*, 1973).

La información de especies iónicas de Ni en la solución del suelo está muy limitada, pero las especies de Ni como Ni^{2+} , NiOH^+ , HNiO_2^- y $\text{Ni}(\text{OH})_3^-$, se presentan cuando el Ni no está completamente quelatado. Generalmente, la solubilidad del Ni en el suelo está inversamente relacionada al pH del suelo.

Bloomfield (1981) investigó que aunque la materia orgánica es hábil para movilizar el Ni de carbonatos y óxidos, también disminuye la adsorción de Ni sobre las arcillas, los enlaces de este metal a los ligandos orgánicos no son muy fuertes. El estado del Ni en los suelos, depende del contenido de Ni en las rocas parentales. Sin embargo, la concentración de Ni en la superficie de los suelos también se refleja en los procesos de formación del suelo y contaminación.

Contenidos altos de Ni están siempre en suelos arcillosos y margosos, en suelos básicos, rocas volcánicas y en suelos orgánicos. En suelos turbosos de serpentina hay altos niveles de Ni en complejos orgánicos solubles (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Con base a los modelos de estabilidad termodinámica, la ferrita de Ni (NiFe_2O_4) es la fase sólida que precipita en los suelos (Sadiq y Enfield, 1984).

Los sulfuros de Ni controlan la concentración de Ni en la solución del suelo. El complejo hidróxido de $\text{Ni}(\text{OH})^+$ y los iones Ni^{2+} , son las formas principales de Ni en la solución del suelo, a un pH mayor de 8, mientras que en suelos ácidos el Ni^{2+} , NiSO_4^0 y NiHPO_4 son importantes, aunque dependen de los niveles de SO_4^{2-} , y PO_4^{3-} (Sposito y Page, 1984).

En condiciones de oxidación en los suelos ácidos, las especies químicas principales son: Ni^{2+} , NiSO_4^0 , NiHCO_3^+ y los complejos orgánicos. En suelos alcalinos encontramos: NiCO_3^0 , NiHCO_3^+ , Ni^{2+} y $\text{NiB}(\text{OH})_4^+$.

El factor que determina la distribución de Ni entre la fase sólida y la solución del suelo se debe al pH, mientras que los factores como el contenido de arcilla y las cantidades de óxidos hidratados de Fe y Mn en el suelo son de importancia secundaria (Anderson *et al.*, 1973).

Rango promedio en el mundo de Ni en el suelo = 4 a 55 mg kg⁻¹

3.3.6.2. Formas y funciones en la planta

Welch (1979), presentó algunos reportes, indicando que el Ni es un componente esencial de las ureasas, y de esa forma el Ni puede ser necesario para la nodulación en leguminosas. Los estudios de la captación y ambiente químico del Ni en plantas esta relacionado principalmente a la toxicidad teniendo posibles implicaciones con respecto a los animales y el hombre.

Cataldo *et al.*, (1978) estudiaron en detalle la absorción, distribución y formas de Ni en plantas de frijol de soya; donde demostraron que cuando el Ni está en la fase soluble, es absorbido por las raíces. El Ni captado por las plantas esta positivamente correlacionado con las concentraciones de Ni en las soluciones.

Al igual que otros cationes divalentes (Co²⁺, Cu²⁺ y Zn²⁺), el Ni²⁺ se conoce por formar compuestos orgánicos y complejos. Cataldo *et al.*, (1978) reportaron que una gran cantidad de Ni estaba constituido de compuestos < 10 000 mol, sin embargo Wiersma y Van Goor (1979) encontraron complejos con compuestos con un peso molecular en el rango de 1,000 a 5,000 con una carga global negativa. También encontraron el Ni ligado a los complejos orgánicos aniónicos en exudados del xilema. Aunque el transporte y acumulación de Ni se ha visto que está controlado metabólicamente, este metal es móvil en las plantas y es acumulado en hojas y semillas.

El Ni es tomado fácil y rápidamente por las plantas, y ciertas concentraciones de Ni llegan al tejido de las plantas, la adsorción está correlacionada con las concentraciones de Ni en el suelo. Los factores vegetales y pedológicos afectan la captación por las plantas, pero el factor más determinante esta influenciado por el pH del suelo. Como Berrow y Burrige (1979) encontraron que al subir el pH de 4.5 a 6.5 disminuyó el contenido de Ni en avena por un factor de cerca de 8.

El síntoma más comun de fitotoxicidad de Ni es la clorosis, muy parecida a la inducida por Fe. En los tejidos vegetales la absorción de nutrimentos, desarrollo radicular fotosíntesis, transpiración y el metabolismo son fuertemente retardados con altos contenidos de Ni.

En condiciones naturales de toxicidad generalmente están asociados con serpentina o bien otros suelos ricos con Ni. Anderson *et al.*, (1973) reportaron que la avena, un cultivo sensible al Ni, cuando es afectado por este metal contenía Ni en las hojas en un rango de 24 a 308 ppm (peso seco). Davis *et al.*, (1978) encontraron que el contenido toxico de Ni en semillas de cebada fue de 26 ppm (peso seco), Khalid y Tinsley (1980) encontraron 50 ppm (peso seco) de Ni en centeno causando una ligera clorosis.

Generalmente el rango de una excesiva o cantidades tóxicas de Ni en la mayoría de especies vegetales varía de 10 a 100 mg kg⁻¹ (peso seco). Varias especies se conocen por su gran tolerancia e hiperacumulación de Ni. Especies, principalmente de familias de Boraginaceae, Cruciferae, Myrtaceae, Leguminosae y Caryophyllaceae son también acumuladoras de Co. La vegetación nativa desarrollada en suelos de serpentina reportaron que contienen arriba de 19 000 mg kg⁻¹ de Ni, en *Hibanthus floribundus* (familia Violaceae) sobre ferralsoles ácidos, acumulando 6.542 mg kg⁻¹ de Ni (peso seco) en hojas, 5,490 en tallos y 221 mg kg⁻¹ en raíz.

La habilidad de algunas especies vegetales para acumular Ni cuando crecen en suelos sobre minerales de Ni puede ser útil como indicadores biogeoquímicos.

3.3.7. Cromo

3.3.7.1. Formas en el suelo

El Cr puede presentarse en varios estados de oxidación, pero las formas comunes más estables son Cr(III) y Cr(IV). Estas tienen propiedades químicas diferentes: El Cr(IV) existe como un anión, se extrae fácilmente del suelo y partículas de sedimento y es considerado la forma más tóxica. El cromato es dependiente del equilibrio del pH, con otras formas de Cr(IV) como HCrO₄⁻ y Cr₂O₇²⁻, la forma predominante a pH > 6 es CrO₄²⁻. El Cr(III) es mucho menos móvil y adsorbe las partículas más fuertemente. La solubilidad de Cr(III) disminuye arriba de pH de 4 y arriba de 5.5 precipita.

El Cr(VI) es la forma más estable en equilibrio con el oxígeno atmosférico. Sin embargo el Cr(VI), con su potencial de reducción alto es fuertemente oxidante y en presencia de materia orgánica el Cr(VI) se reduce a Cr(III) (Bartlett y James, 1988; Cary *et al.*, 1977). La reducción es más rápida en suelos ácidos que en suelos alcalinos. En la mayoría de los suelos, el Cr(III) es la forma menos móvil y relativamente insoluble y generalmente se presenta como óxidos e hidróxidos insolubles. Por ejemplo Cary *et al.*, (1977) observaron que las adiciones de Cr soluble como Cr(VI) o Cr(III) a los suelos resultaron ser insolubles y no disponibles para las plantas. El Cr insoluble en los suelos estaba presente como óxidos hidratados de Cr (III) mezclado con Óxidos de Fe.

La oxidación de Cr(III) en suelos se debe a un pH > 5 y rico en Mn oxidado, aunque no se ha comprobado todavía se piensa que el secado y el almacenamiento destruye la capacidad del suelo para oxidar el elemento (Bartlett y James, 1988). Además encontraron que la cantidad de Cr(III) oxidado a Cr(VI) fue proporcional al Mn reducido y también a la cantidad reducida por la hidroquinona.

Rango promedio en el mundo de Cr en el suelo = 7 a 221 mg kg⁻¹

3.3.7.2. Formas y funciones en la planta

No hay evidencia todavía del papel esencial del Cr en el metabolismo de las plantas, sin embargo se han investigado los efectos positivos sobre el crecimiento de las plantas con contenidos bajos de Cr en los

suelos. El contenido de Cr en plantas está controlado principalmente por el contenido de Cr soluble del suelo (Sposito y Page, 1984). La mayoría de los suelos contienen cantidades significativas de Cr, pero su disponibilidad para las plantas está muy limitada (Flores *et al.*, 1999). Sin embargo, la adición del Cr al suelo afecta el contenido de Cr en las plantas y la proporción de captación del Cr por éstas depende del suelo y la planta misma. Generalmente hay un alto contenido de Cr en las raíces que en las hojas o brotes, sin embargo, la más baja concentración está en los cereales. Varias plantas nativas, principalmente de áreas de serpentina o depósitos de cromita, pueden acumular 0.3% (peso seco) o 3.4% (ceniza) de Cr (Kabata-Pendias y Pendias 2001; Alloway, 1992; Sposito y Page, 1984).

Una baja proporción de Cr captado por las plantas de la fracción soluble de este metal está relacionada al mecanismo de captación por las raíces. Aparentemente, los tejidos de la raíz no son capaces de estimular la reducción de Cr^{3+} al soluble Cr^{2+} , la cual es un proceso clave en la absorción de Fe por las plantas. La forma más disponible para las plantas es el Cr^{6+} , la cual es la forma más inestable bajo condiciones normales del suelo. Sin embargo, los mecanismos de absorción y translocación de Cr en plantas se ha visto que son similares al del Fe, la cual está reflejada en la relación completamente estable Cr/Fe en tejidos vegetales (Cary *et al.*, 1977). Tiffin (1977) concluyó que el Cr es transportado en las plantas como complejos aniónicos las cuales han sido identificados en los extractos de tejidos vegetales y en el xilema. La presencia de trioxalatocromato en hojas también ha sido reportado (Timker, 1981, citado por Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El contenido de Cr en las plantas ha recibido mucha atención desde el reciente descubrimiento, de que el Cr participa en el metabolismo de la glucosa y el colesterol, y por lo tanto es esencial para el hombre y para los animales. Los niveles comunes de Cr en el material vegetal se encuentran en el orden de 0.02 a 0.2 mg kg^{-1} (peso seco); sin embargo, existe una gran variación en plantas comestibles. Las concentraciones de Cr en las plantas varía ampliamente para el tipo de tejido y etapas de crecimiento.

Anderson *et al.*, (1973) reportaron toxicidad en avena con 49 mg kg^{-1} de Cr (peso seco) desarrollada en suelos con 634 mg kg^{-1} de Cr.

3.3.8. Cadmio

3.3.8.1. Formas en el suelo

La mayoría de los suelos contienen $< 1 \text{ mg kg}^{-1}$, excepto aquellos de fuentes contaminadas de fuentes o desarrollados a partir de materiales parentales con altos contenidos de Cd como los esquistos negros (Aylett, 1979; Alloway, 1992; Kabata-Pendias y Pendias, 2001). Dentro de los perfiles del suelo, el Cd está presente a altas concentraciones en los horizontes superficiales. El alto contenido de humus también contribuye a la capacidad adsorptiva del horizonte superficial. Pocos datos están disponibles acerca de la distribución de Cd en los perfiles de suelos. (Colombo *et al.*, 1998) realizaron algunos estudios en Mollisoles y Alfisoles donde las concentraciones promedio en los horizontes superficiales fueron de 0.39 mg kg^{-1} y 0.23 mg kg^{-1} de Cd en los horizontes subsuperficiales. En los suelos rehabilitados se encontró que el mayor

contenido de Cd y otros metales pesados permanecen en los primeros 15 cm, aunque el Cd tiende a bajar a través del perfil más fácilmente que el Pb o el Cu. Colombo *et al.*, (1998) encontraron que el Cd, Ni y Zn se lixiviaron más fácilmente que el Cu y Pb en columnas de dos suelos japoneses, por lo que constituye un gran riesgo de contaminación. No obstante, muchos trabajos consideran que el Cd tiene poca amenaza en la calidad de aguas subterráneas.

Los fertilizantes fosfatados con contenidos altos de Cd encontrados en la mayoría de fosforitas son una fuente de contaminación de Cd en suelos agrícolas (Alloway, 1992; Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Es importante identificar las formas de los metales en los suelos, especialmente en la solución del suelo para comprender las dinámicas del metal en los ecosistemas agrícolas y naturales. El efecto tóxico del metal está determinado más por la forma que por su concentración. El ión Cd^{2+} es más fácilmente adsorbido sobre las superficies sólidas que otras especies aniónicas (Estévez *et al.*, 1998).

Las concentraciones y especiación del metal como el Cd en la solución del suelo dependerán parcialmente sobre la concentración de ligandos en la solución del suelo y de las constantes de estabilidad de los complejos ligando-metal. Los parámetros tales como pH, carbono orgánico, concentraciones de aniones y cationes facilitan que especies químicas de Cd se encuentren en el suelo: El Cd(II), $CdSO_4(0)$ y $CdCl^+$ en suelos ácidos y Cd(II), $CdCl^+$, $CdSO_4(0)$ y $CdHCO_3^+$ en suelos alcalinos (Sposito y Page, 1984).

El equilibrio dinámico entre el Cd en la solución del suelo y que es adsorbida por la fase sólida del suelo depende del pH, la naturaleza química del metal, la estabilidad de complejos de Cd, el poder de enlace de los grupos funcionales, la concentración iónica de las soluciones y iones que compiten. El Cd tiende a ser más móvil en los suelos haciendo que las plantas lo asimilen más que otros metales, incluyendo el Pb y el Cu.

Rango promedio en el mundo de Cd en el suelo = 0.06 a 1.1 mg kg⁻¹

3.3.8.2. Formas y funciones en la planta

Los procesos químicos que ocurren en el suelo afectan la disponibilidad del Cd por las plantas. La toxicidad por Cd puede presentarse en las plantas sobre suelos severamente contaminados.

Concentraciones relativamente grandes de Cd pueden acumularse en las partes comestibles sin que la planta muestre síntomas de estrés (Johaston, 1977). La toxicidad de Cd se manifiesta por la clorosis en las hojas, marchitamiento y crecimiento achaparrado, pero rara vez se detecta. Algunos casos de toxicidad en suelos contaminados por metales pesados se deben a los excesos de otros elementos presentes en concentraciones altas (Chapman y Pratt, 1973; Sposito y Page, 1984).

La cantidad de Cd tomada por las plantas depende del suelo y de la planta misma. La cantidad total del elemento presente en el suelo es uno de los factores principales que afectan los contenidos de Cd en las plantas Kabata Pendias y Pendias, (2001). Alloway (1992), encontró que el Cd total está correlacionado estrechamente con los contenidos de Cd en las partes comestibles de berza, zanahoria, lechuga y rábano desarrollados en 50 suelos diferentes contaminados de varias fuentes.

El origen del Cd en el suelo también afecta su biodisponibilidad. Alloway (1992) encontró que el Cd en suelos contaminados de fuentes orgánicas, como la minería metalífera y fundidoras tienden a acumularse en las partes comestibles de las hortalizas que de los suelos rehabilitados con lodos residuales. Los lodos residuales son la fuente más común de concentraciones relativamente altas de Cd en los suelos. La materia orgánica aplicada en los lodos residuales aumentó la capacidad de adsorción de metal en los suelos enmendados.

CAPÍTULO 4

OBJETIVOS

4.1. OBJETIVOS GENERALES

1. Evaluar los niveles de contaminación por salinidad, sodicidad, metales traza y metales pesados en suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.
2. Evaluar la acumulación de metales traza y metales pesados en *Beta vulgaris* L. var. *cicla* desarrollada en suelos de la zona de estudio sometidos a contaminación por Pb y Ni.

4.2. OBJETIVOS PARTICULARES

1. Determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.
2. Determinar los niveles de salinidad y sodicidad en los suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.
3. Determinar los tipos de sales solubles que se encuentran en los diferentes perfiles edafológicos para establecer el régimen fisicoquímico y geoquímico de las soluciones salinas.
4. Determinar el contenido de los metales traza (Fe, Cu, Mn, Zn) y metales pesados (Pb, Ni, Cr, Cd) extractables y totales en los suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.
5. Realizar un análisis de correlación múltiple de Pearson entre las propiedades físicas y químicas; metales traza y metales pesados extractables y totales.
6. Evaluar las variables de respuesta: biomasa total, peso seco en follaje y raíz, longitud total, ancho de la hoja y número de hojas en la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) desarrollada en invernadero.
7. Determinar la concentración de metales traza (Fe, Cu, Mn, Zn) y metales pesados (Pb, Ni, Cr, Cd, Co) en la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*).
8. Determinar el contenido de los metales traza (Fe, Cu, Mn, Zn) y metales pesados (Pb, Ni, Cr, Cd) extractables y totales en los suelos de invernadero antes y después de la cosecha de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*).

4.3. HIPÓTESIS

- 1.** El alto pH de los suelos de la zona de estudio derivado de la presencia de condiciones de sodicidad origina que la concentración de metales traza y metales pesados no resulte tan perjudicial para las plantas, ya que dichos iones son generalmente adsorbidos, fijados o precipitados a esos rangos de pH.
- 2.** El uso de aguas negras en diferentes estaciones del año favorece el ascenso de soluciones salinas subsuperficiales.
- 3.** Las aguas negras urbano-industriales de la Ciudad de México que se utilizan para riego han provocado que en las capas superiores de los suelos se tengan concentraciones elevadas de metales pesados.
- 4.** La presencia de altos niveles de metales traza y metales pesados en los suelos afecta el desarrollo de las plantas debiendo existir una correlación negativa entre el rendimiento y la acumulación de estos metales en los tejidos de la planta.

CAPÍTULO 5

DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

5.1. DELEGACIÓN DE XOCHIMILCO, D.F.

5.1.1. Localización

La Delegación Xochimilco se sitúa geográficamente entre los meridianos 88° 09' 04" y 99° 00' 02" de longitud oeste y los paralelos 19° 17' 35" y 19° 08' 57" de latitud norte, a una altitud aproximada de 2240 msnm. Sus límites son al norte y oeste con la Delegación de Tlalpan, al sur con la Delegación Milpa Alta y este con la Delegación Tláhuac.

Xochimilco cuenta con 14 pueblos: Santa María Tepepan, Santa Cruz Xochitepec, Santiago Tepelcatlapan, San Lucas San Mateo Xalpa, San Francisco Tlalnepantla, Santa Cecilia Tepetlapan, San Andrés Ahuayuca, San Lorenzo Atemoaya, Santa María Nativitas, Santa Cruz Acalpixca, San Gregorio Atlapulco, San Luís Tlaxialtemalco y Santiago Tulyehualco. De éstos, los cinco últimos han sido pueblos chinamperos desde épocas precoloniales.

La zona chinampera de Xochimilco se localiza en lo que fue el Lago Chalco-Xochimilco, al noreste de la Delegación de Xochimilco. Actualmente el Lago lo constituyen una serie de canales que rodean a las chinampas. El área chinampera tenía una superficie original de 21 000 has, ahora cuenta con aproximadamente 800 has de las cuales más del 50% ya no son cultivadas (Balanzario, 1976).

5.1.1.1. San Luís Tlaxialtemalco

San Luís Tlaxialtemalco, limita al Norte con el Canal de Chalco y los ejidos de Santiago Zapotitlán y San Pedro Tláhuac; al sur con el entorno montañoso del Cerro Teutli y la vecina Milpa Alta, al oeste con Santiago Tulyehualco y al oeste con San Gregorio Atlapulco.

Cuenta con tres canales principales: el de Chalco, el de Ameca y el Nacional, que hoy día reciben las aguas residuales provenientes de la planta tratadora del Cerro de la Estrella, por el paraje denominado "Atepozanco" lugar ubicado en el vértice de los dos primeros canales y que sirven como fuente a múltiples pequeños canales y zanjas que nutren las chinampas.

Actualmente se siembran 150 hectáreas de maíz. Con una variedad única llamada maíz chinampero, ya que los maíces híbridos no han dado resultados satisfactorios en las chinampas. El segundo cultivo en importancia y extensión es el de flores y plantas de ornato.

Hace 30 años el poblado era una fuente principal de abastecimiento de legumbres de la Ciudad de México. Diariamente se comercializaban dos camiones de redilas cargados de verduras.

Hoy en la actualidad la producción de verduras es casi inexistente.

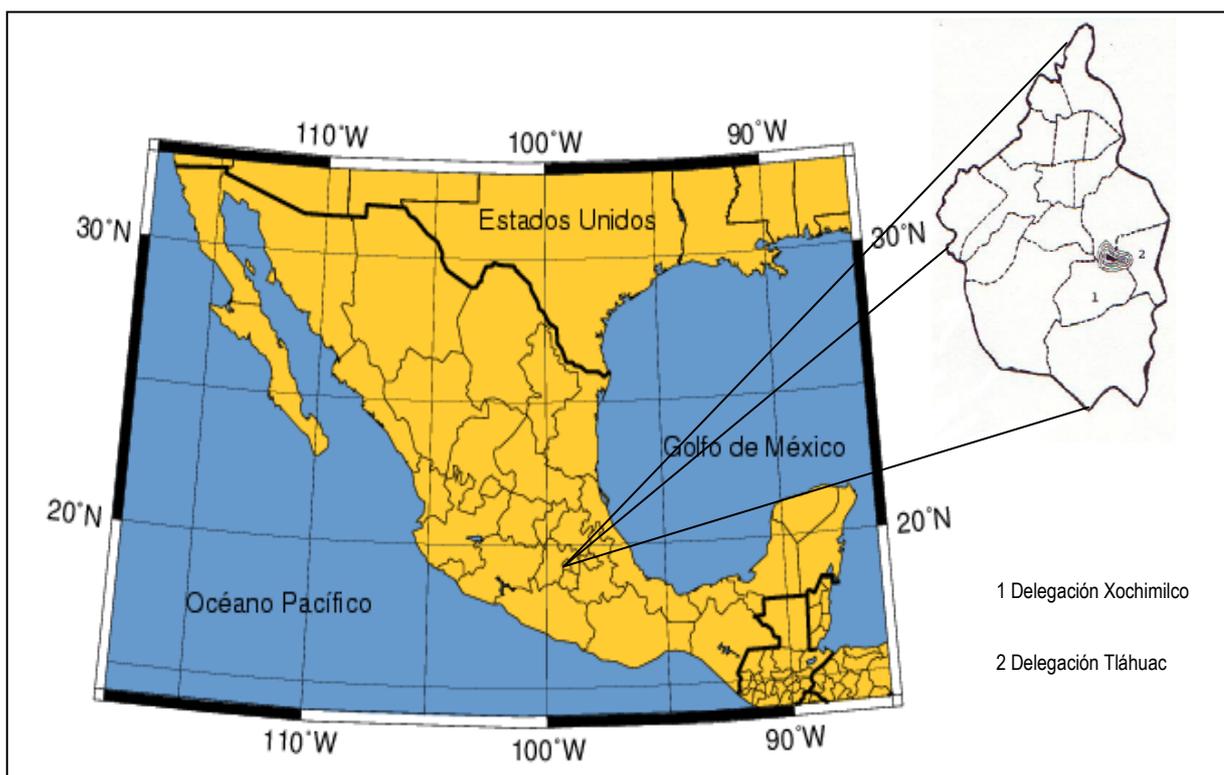


Figura 5.1. Mapa de localización de las zonas de estudio.

5.2. DELEGACIÓN DE TLÁHUAC, D.F.

5.2.1. Localización

La Delegación de Tláhuac se encuentra limitada por las Delegaciones: Iztapalapa al norte, Milpa Alta al sur, Xochimilco al oeste y por el Estado de México al este. Se encuentra a 26 km al suroeste de la Ciudad de México entre los paralelos 19° 16' 06" de latitud norte y 99° 00' 16" de longitud oeste, con una altitud de 2,400 msnm.

La Delegación de Tláhuac se encuentra dividida en siete pueblos: San Pedro Tláhuac, Santiago Zapotitlán, Santa Catarina Yecahuizotl, San Francisco Tlaltenco, San Juan Iztayopan, San Andrés Míxquic y San Nicolás Tetelco (INEGI, 1997). Presenta una superficie de 101.06 km², el cual representa el 6.74% del área total del D.F. (Galicia, 1990).

5.2.1.1. San Andrés Mixquic

Los límites geográficos de San Andrés Mixquic se encuentran ubicados aproximadamente entre 19°13' latitud norte y 98°58' longitud oeste a una altitud aproximada de 2 220 msnm.

5.2.2. Geología

Las zonas de estudio forman parte del Eje Neovolcánico, entre los paralelos 19° y 21° latitud norte abarcando aproximadamente 959 km de extensión. El Eje presenta una gran cantidad de estructuras extrusivas como calderas, conos ígneos secundarios y restos de cuellos volcánicos. Toda esta gran provincia volcánica, aunque a veces discontinua, constituye una de las masas más extensas de Norteamérica.

Su petrología es muy heterogénea, se encuentran secuencias de rocas andesíticas, riolitas y basaltos en este orden de antigüedad (López, 1981). Su pleno desarrollo lo alcanzó durante el Pli-Pleistoceno; dando lugar a importantes moles de rocas volcánicas de más de 5,000 m de altura como son los volcanes del Popocatepetl, Ixtaccíhuatl y el Pico de Orizaba.

Según Mooser (1961), en el Valle de México pueden encontrarse estructuras geológicas de 3 edades diferentes: del Oligoceno-Mioceno representado por la Sierra de Xochitepec; Plioceno representado por la sierra de Santa Catarina y Cuaternario (Pleistoceno-Holoceno) representado en la parte sur de la Delegación Xochimilco por la Sierra Chichinautzin.

Tláhuac pertenece a la depresión de Xochimilco-Chalco, una llanura lacustre aluvial del Cuaternario, presenta zonas escarpadas en la zona norte de la Sierra de Sta. Catarina con fuertes pendientes hacia el sur, en el volcán Teutli (Quiroz, 1984 citado por Fuentes, 2001). La zona lacustre Xochimilco-Chalco tiene influencia al noroeste con la Sierra de las Cruces, al sur con la Sierra Chichinautzin y al este con la Sierra Nevada.

5.2.3. Fisiografía

Las Delegaciones de Xochimilco y Tláhuac, se sitúan dentro de la zona fisiográfica Planicie Meridional de la Cuenca de México a una altitud de 2 240 m, sus límites son al norte con la Sierra de Guadalupe y la Sierra de Patlachique, al sur la Sierra Chichinautzin y Cuautzin, al este la Sierra Nevada y al oeste la Sierra de las Cruces.

Desde el punto de vista orográfico se contemplan en Xochimilco numerosos cerros como Teutli (2 712 m), Tlamacaxco (2 660 m), Teoca (2 650 m), Tochuca (2 550 m), Tzompole (2 250m) y Tlamapa (2 550 m) que se localiza al sur de la Delegación en la zona media boreal de la Sierra del Ajusco (3 930 m). Hacia el oeste se localizan los cerros de Tehuanpaltepec (2 841 m), la Cantera (2 805 m), Tetequilo (2 600 m) y Xochitepec (2 495 m); los cerros de la Noria (2 250 m), Xilotepec (2 300 m) y Moyoyepec (2 263 m) (Mendoza, 1961).

En Tláhuac la zona montañosa está conformada por conos cineríticos como el cerro de Guadalupe, Teutli, Xaltepec y el cerro Tetecón con una altitud máxima de 2 710 msnm pertenecientes a la Sierra de Santa Catarina.

5.2.4. Hidrología

El exlago de Xochimilco tuvo una forma irregular, alargado de oriente a poniente con más de 11 km de largo, 2 de ancho y con un área total de 2 200 has aproximadamente. Se sitúa en el extremo sur del Valle de México y limita con la Sierra Nevada y la Sierra del Chichinautzin.

En la actualidad lo constituyen una serie de canales de 189 km aproximadamente que rodean a las chinampas. Entre los principales canales se tienen: el canal de Chalco, Cuemanco, Nacional, Caltongo, San Cristóbal, el Bordo, Japón, Apatlaco, Tlicuili y Tlilac entre otros. En sí, la Delegación de Xochimilco casi no cuenta con corrientes de agua pero su importancia hidrológica es notable debido a la gran cantidad de canales que limitan a sus famosas chinampas. Sin embargo existen pequeños ríos pluviales que son de temporal y por lo tanto de corrientes intermitentes que bajan de las estribaciones de las serranías colindantes.

Otro aspecto que contribuyó a la importancia hidrológica de Xochimilco, fueron sus innumerables manantiales de agua potable, quienes eran la principal fuente reguladora del nivel del lago de Xochimilco; generalmente se localizaban al pie de las innumerables colinas de la parte sur y sureste, algunos de ellos se mencionan a continuación: los manantiales de Nativitas, La Noria o San Juan Tzomonolco, Tlaxialtemalco, El Niño, Xaltocán, San Gregorio Atlapulco, San Juan Acuezcomac, Santa Cruz Acalpíxca y Santiago Tulyehualco entre otros (Bastida y Maciel, 1986).

El ex-lago de Tláhuac se encuentra actualmente reducido a una serie de canales llamados “acalotes”, que son de mayor importancia y anchura; estos están constantemente perturbados debido al frecuente dragado para evitar el azolve y la continua extracción del lirio acuático a fin de mantener y garantizar la vialidad para el transporte de hortalizas o abonos animales.

5.2.5. Clima

La estación climatológica Xochimilco se encuentra muy próxima a la zona de estudio, y está ubicada en las coordenadas geográficas 19° 16' latitud norte y 99° 06' longitud oeste.

García (1988), indica que Xochimilco presenta un clima subtipo Cb (w_2) (w) (i') dentro del clima C(w), es decir templado subhúmedo con lluvias en verano. Según las características de este clima, es el más seco de los templados subhúmedos. La temperatura del mes más frío oscila entre -3 y 18°C ; la precipitación media anual es mayor de 500 mm y menor de 1740 mm.

De acuerdo a las nuevas modificaciones de García (1988), la designación Cb indica una temperatura media anual entre 12° y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura del mes más caliente menor a 22°C. Casi 5/6 partes de la lluvia anual caen durante los seis meses de mayo a octubre (con mayor precipitación en junio, julio, agosto y septiembre). Se presenta un déficit hídrico de noviembre al mes de abril, siendo más severo en enero, febrero y marzo.

Las heladas son fuertes y frecuentes en los meses de diciembre, enero y febrero (su número ha llegado a alcanzar de 50 a 75 heladas al año) terminan con los vientos alisios que llegan del noreste. Al parecer son producto de invasiones de masas de aire frío provenientes de la Sierra Chichinautzin.

Las tolvaneras tienen orientación NE y ENE a SO y son muy frecuentes en febrero y marzo, debido a la escasez de agua en esta época y la fuerte insolación que favorece la inestabilidad de la atmósfera aumentando la turbulencia del aire.

La zona de San Pedro Tláhuac, presenta un clima de acuerdo con la clasificación de Köppen modificado por García (1988) al tipo C(W₁) (w) b(i), templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media con un verano fresco y una temperatura media anual de 15.1°C. La precipitación pluvial orográfica convectiva tiene poca variación con precipitaciones de 611.6 a 677.6 mm al año con una mayor incidencia en los meses de mayo a septiembre y con precipitaciones mínimas el resto del año.

San Andrés Míxquic, Tláhuac presenta una ligera variación con menor humedad en el verano por lo tanto el clima del sitio es C(W₀) (W) b(i). La precipitación es de aproximadamente de 700 mm, con una temperatura media anual de 14.6°C. La evapotranspiración es mayor a la precipitación en casi todo el año, excepto en los meses de junio a septiembre (INEGI, 1997 citado por Fuentes, 2001).

5.2.6. Vegetación

En las zonas de mayor altitud tanto de la Delegación de Xochimilco y Tláhuac, se desarrolla una vegetación de bosque mixto de pinos *Pinus spp.*, cedros *Cupressus spp.*, encinos *Quercus spp.*, madroños *Arbustus spp.*, tepozanes *Buddleia cordata* Kunth; eucaliptos *Eucalyptus spp.*, y ahuehuetes *Taxodium mucronatum* Ten. Los más abundantes son cedros y madroños.

En los lomeríos se observan capulines *Prunus capuli* Cav, aguacate *Persea americana* Mill, duraznos *Prunus persica* L. Batsch; pirules *Schinus molle* L. y cítricos *Citrus spp.*, entre otros.

En la zona lacustre, sembrados a las orillas de las chinampas se encuentra el árbol típico chinampero conocido como ahuejote *Salix bomplandiana* Kunth y *Salix humboldtiana* Willd.

En las chinampas se encuentran diferentes zacates entre los cuales se mencionan; el zacate robusto *Echinochloa sp.*, zacate pata de gallo *Cynodon dactylon* L. Pers., zacate criollo *Hordeum adscendens* Kunth, carrizos *Gynerium sagittatum* (Aubl.) P. Beauv.

También se han establecido algunas halófitas tales como: *Distichlis spicata* L. Greene, *Heliotropium curassavicum* L., *Suaeda diffusa* S. Watson y *Datura stramonium* L., entre otras. Entre la

gran variedad de especies cultivadas se encuentran: el maíz *Zea mays* L., la acelga *Beta vulgaris* var. *cicla* L., el betabel *Beta vulgaris* var. *crassa* Alef., los romeritos *Suaeda torreyana* S. Watson, la coliflor *Brassica oleracea* var. *botrytis* L., la col *Brassica oleracea* var. *capitata* L., el brócoli *Brassica oleracea* var. *cauliflora* L. la espinaca *Spinacea oleracea* L., la zanahoria *Daucus carota* L., los rábanos *Raphanus sativus* L., el apio *Apium graveolans* L., el cilantro *Coriandrum sativum* L., la calabaza *Cucurbita pepo* L., el chilacayote *Cucurbita ficifolia* Bouché, la lechuga *Lactuca sativa* L., el jitomate *Lycopersicum esculentum* Mill., la alegría o amaranto *Amaranthus hypocondriacus* L. Thell., el alhelí *Mathiola incana* R. Br. y el cempazuchitl *Tagetes erecta* L. También se desarrollan los quintoniles o quelites *Chenopodium sp.*, el chile *Capsicum annum* L., el tomate *Physalis ixocarpa* Hornem, la manzanilla *Matricharia chamomilla* L., la hierbabuena *Mentha sativa* L. Reichemb y el epazote *Chenopodium ambrosioides* L., entre otras.

En la vegetación acuática entre las especies más importantes por el tamaño de su población y biomasa se encuentran el lirio acuático, *Eichhornia crassipes* (Martius) Solms (huachinango, jacinto o lirio de agua), *Limnobium stoloniferum* (G. Mey) Griseb., *Wolffia columbiana* H. Karst (chilacastle o lentejilla). Se encuentran también, aunque en menor abundancia tules, *Typha dominguensis* Pers., y *Typha latifolia* L. (tule ancho, masa de agua o espadañas), *Scirpus americanus* Pers. (tule esquinado o zacatule).

Novelo y Gallegos (1988) reconocen cuatro tipos de ambientes ecológicos acuáticos dentro del sistema de chinampas: acalotes, apancles, ciénegas y lagunas. Estos ambientes presentan marcadas diferencias en cuanto a sus características ambientales y en la flora que sostienen.

5.2.7. Suelos

En la Delegación de Xochimilco existen suelos de origen volcánico y de origen aluvial lacustre. Los primeros se localizan en toda la parte sur de la Delegación, colindan con las serranías del Chichinautzin y Ajusco-Cuatzin; tradicionalmente han sido llamadas “tierras altas”, se caracterizan por ser de textura migajón-arenosa, presentar colores que van de pardo a negro, de reacción de suelo ligeramente alcalina, son pobres en materia orgánica, sales solubles, N y P; en general son ricos en Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} .

Reyes, (1985) menciona que los suelos de las partes altas de Xochimilco se formaron a consecuencia de la intemperización de la roca madre constituida principalmente por materiales de origen volcánico. Estos suelos (migajón arenoso) frecuentemente están expuestos a la erosión debido a la tala inmoderada de sus bosques.

Los suelos de origen aluvial lacustre se localizan en las zonas más bajas de la región y constituyen la llanura producto del acarreo y depósito de materiales intemperizados de las partes altas colindantes. El acarreo de materiales se acentúa por la inclinación sur-norte que existe en la zona.

Los suelos que forman las chinampas en la zona lacustre son de origen antrópico por lo que se clasifican como Antrosoles cumúlicos (FAO UNESCO, 1990 In: Ramos, *et al.*, 2001) y Antrosoles térricos con base a la Base Referencial de Suelos WRB (SICS-ISRIC-FAO, 1999).

Aguilera *et al.*, (1987 a 1995), realizaron varios informes anuales de trabajo al CONACYT sobre diferentes proyectos de rehabilitación de suelos de chinampas y su relación con las plantas cultivadas (Galicia, 1990; Mercado, 1993).

Lugo, (1984); Trejo, (1984); Escobedo, (1987); Fernández, (1988) y Medina, (1993) y Chávez, (2000) encontraron algunas diferencias entre las propiedades físico-químicas del suelo, con colores oscuros, densidades aparentes y densidades reales bajas, textura franca, pH de 7.5 a 9.5, altos porcentajes de materia orgánica, N, P y K. CIC alta, además con un exceso de sales y sodio por lo que se les ha considerado según USDA como suelos salinos y salinos-sódicos. Su textura es predominantemente arcillosa o franca.

Otros estudios se han enfocado a tratar de resolver el problema de la contaminación salino-sódica de los suelos, empleando diferentes concentraciones de algunos mejoradores químicos ($\text{FeSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, H_2SO_4 , CaCl_2 y FeCl_3) empleando láminas de lavado, abonos, compostas y mejoradores biológicos a base de electrolitos (Reyes *et al.*, 1997).

Reyes (1985) y Fernández (1987) cultivaron *Raphanus sativus* L., bajos condiciones de invernadero en suelos de chinampa (Xochimilco) empleando láminas de lavado y algunos mejoradores como el FeCl_3 .

Basurto en 1985, cultivó *Phaseolus vulgaris* L., en condiciones de invernadero en suelos de chinampa (Xochimilco) con problemas de sales y sodio empleando yeso como mejorador inorgánico y porqueraza como mejorador orgánico.

Vallejo y Aguilera (1993), realizaron ensayos experimentales para ver el efecto de mejoradores minerales y biológicos, empleando láminas de lavado de una chinampa de Xochimilco con *Phaseolus vulgaris* L. y *Raphanus sativus* L.

Celada (1993), estudió las fracciones húmicas en los suelos de chinampa de Xochimilco, empleando además los mejoradores orgánicos (estiércol de vaca) para recuperar los problemas de salinidad y sodicidad de los suelos.

Castillo (1993), evaluó el efecto de H_2SO_4 y lámina de lavado mediante el uso de *Lactuca sativa* var. *white boston* bajo condiciones de invernadero y su efecto sobre las propiedades físicas y químicas del suelo.

Ramos y Aguilera (1993) emplearon el sulfato ferroso como mejorador y fertilizantes, en una chinampa de Xochimilco también con problemas de salinidad y sodicidad.

Valdez en 1995 hizo un estudio de recuperación de un suelo salino sódico aplicando un mejorador biológico M-GVM en una chinampa de la laguna del Toro en Xochimilco.

En la Delegación de Tláhuac, también se realizaron algunos estudios de suelos referente al uso de mejoradores minerales y mejoradores biológicos empleando especies de plantas que se producen en la zona como *Lactuca sativa* L., *Tagetes erecta* L., y *Raphanus sativus* L.

El uso de estos suelos ha sido reducido debido a la contaminación por sales y sodio así como drenaje interno deficiente, pasan de primera y segunda calidad agrícola a suelos de tercera, llegando a su abandono total.

Galicia (1990), trabajó sobre el efecto del mejorador mineral yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en suelos de chinampa de Tláhuac, D.F., cultivando *Brassica oleracea* L. var. *cauliflora*.

Sotelo y Aguilera (1993), realizaron ensayos experimentales en suelos de chinampa de Tláhuac, empleando mejoradores biológicos 1 y 2 y mejoradores minerales 1 y 2 utilizando *Lactuca sativa* L., *Tagetes erecta* L. y *Raphanus sativus* L.

Ibáñez (1993), evaluó el efecto de los mejoradores biológicos, fertilización y abonamiento en un cultivo de *Spinacea oleracea* L. var. *hibrido cascade* en suelos de chinampa de Tláhuac.

CAPÍTULO 6

MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. DE CAMPO

Se colectaron los suelos de la zona chinampera en el sitio 1 (Xochimilco); en el sitio 2 (San Luís Tlaxiátemalco); en el sitio 3 (Tláhuac) y en el sitio 4 (Míxquic), D.F.

En el sitio 1 se muestrearon 2 perfiles de suelos: P-1 y P-2.

El P-1 tuvo una profundidad de 170 cm y el P-2 de 120 cm.

El P-1 se localiza en Tecalitla a 19°16'9.7" LW entre la Laguna del Toro y Pista de Canotaje; con una altitud de 2 100 msnm y una pendiente de 1%. La chinampa tiene una extensión de 500 m y se cultivan 346 m² con acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*), lechuga (*Lactuca sativa* L.) y brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *cauliflora*).

El P-2 se localiza al final del canal de Tlaltenco, a 19°16'46.5" LN y 99°05'17.3" LW registrándose una altitud de 2 100 msnm y una pendiente del 1%. Anteriormente se cultivaba rábano (*Raphanus sativus* L.), betabel (*Beta vulgaris* L.), maíz (*Zea mays* L.), romero (*Suaeda difusa* S. Watson), lechuga (*Lactuca sativa* L.), coliflor (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*), brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *cauliflora*) y desde hace 25 años no se siembra.

En el sitio 2 se muestrearon 3 perfiles de suelos: P-3, P-4 y P-5.

El P-3 tuvo una profundidad de 140 cm; el P-4 de 140 cm y el P-5 de 180 cm.

El P-3 se localiza a 19°15'45.7" de LN y 99°02'4.4" de LW con una altitud de 2 210 msnm con una pendiente de 3%. Tiene una superficie de una ha y media. Se siembra maíz (*Zea mays* L.), desde hace más de 30 años. Se aplica estiércol de ganado vacuno como abono.

El P-4 se localiza a 19°15'33.2" de LN y 99°02'5.2" de LW con una altitud de 2 210 msnm y una pendiente de 2.5%. Actualmente se cultiva maíz (*Zea mays* L.)

El P-5 se localiza a los 19°15'46.5" de LN y 99°01'55.3" de LW cerca del Canal Nacional, registrándose una altitud de 2 210 msnm con una pendiente del 3%. La extensión de la chinampa es de 2 750 m², actualmente se siembra maíz (*Zea mays* L.)

En el sitio 3 se muestrearon 3 perfiles de suelos: P-6, P-7 y P-8.

El P-6 tuvo una profundidad de 110cm; el P-7 de 100 cm y el P-8 de 150 cm.

El P-6 se localiza a 19°15'58.4" de LN y 99°00'23.1" de LW, registrándose una altitud de 2 050 msnm y una pendiente del 2%. La extensión de la chinampa es de 4 448 m² y actualmente se siembra maíz (*Zea mays* L.).

El P-7 se localiza a los 19°16'3.8" de LN y 99°00'33.9" de LW registrándose una altitud de 2 080 msnm y una pendiente del 1%.

Las dimensiones de las chinampas son de 134 m de largo por 115 m de ancho. En la superficie de la chinampa hay una gran cantidad de sales, con cultivos de brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *cauliflora*) y coliflor (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*).

El P-8 se localiza a 19°16'5.6" de LN y 99°00'20.0" de LW. En este sitio se registró una altitud de 2 080 msnm con una pendiente del 1%.

En el sitio 4 se muestrearon 2 perfiles de suelos: P-9 y P-10.

El P-9 tuvo una profundidad de 90 cm y el P-10 de 140 cm.

El P-9 se localiza a 19°13'13.8" de LN y 98°57'29.3" de LW. Se registró una altitud de 2 220 msnm con una pendiente de 2.5%.

Actualmente se cultiva apio (*Apio graveolens* L.).

El P-10 se localiza a 19° 13'17.8" de LN y 98°57'28.3" de LW; tiene una altitud de 2 199 msnm con una pendiente del 3%.

Las dimensiones aproximadas son de 25 m de ancho por 25 m de largo, se siembra coliflor (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*), acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) y brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *cicla*).

De cada uno de los perfiles se muestreo una cantidad aproximada de 2.5 kg de suelo cada 10 cm de profundidad, posteriormente se guardaron en bolsas de polietileno dobles previamente etiquetadas.

Las muestras se secaron al aire y posteriormente se molieron ligeramente en un mortero de madera. Después se tamizaron empleando un tamiz de 2 mm de abertura y se determinaron las propiedades físicas y químicas en cada una de las muestras.

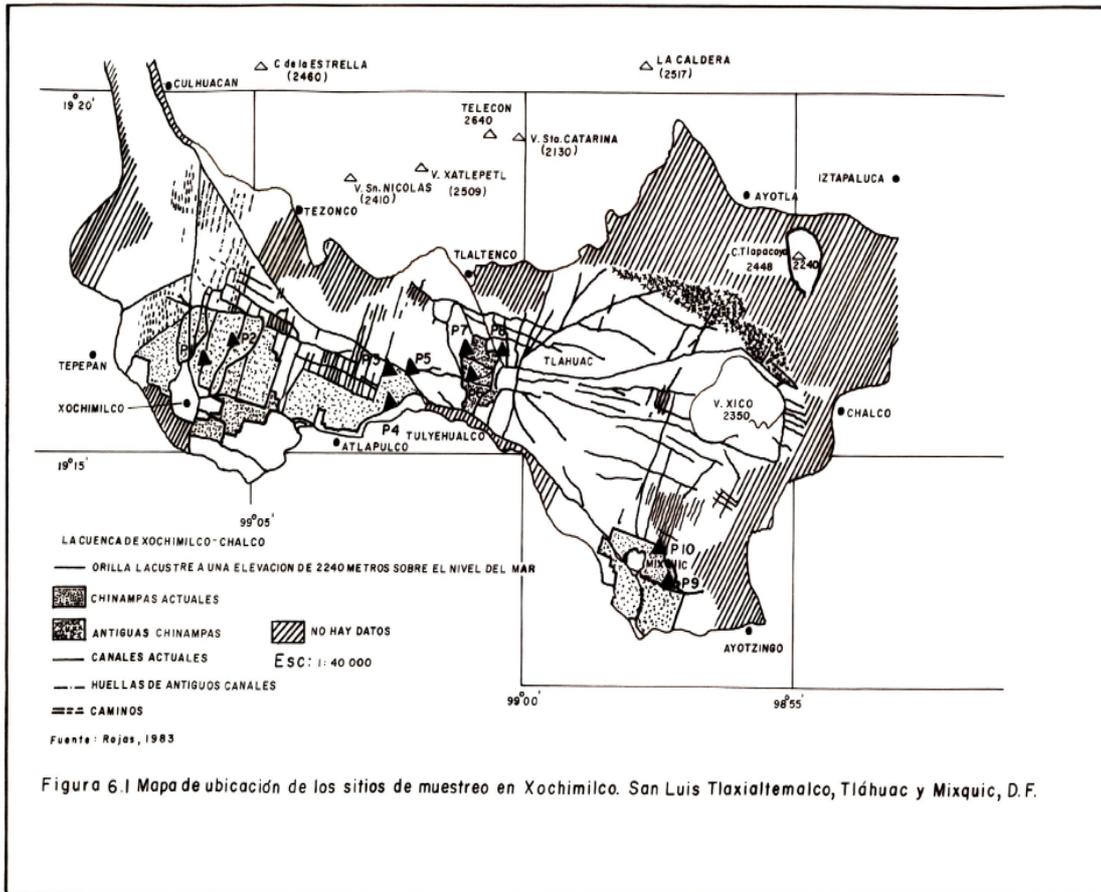


Figura 6.1 Mapa de ubicación de los sitios de muestreo en Xochimilco, San Luis Tlaxiátemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.

6.2. DE LABORATORIO

6.2.1. Propiedades Físicas

1. Porcentaje de humedad, por el método gravimétrico (Baver, 1973).
2. Color en seco y en húmedo, por comparación con las tablas Munsell (1975).
3. Densidad aparente por el método de la probeta (Baver, 1973).
4. Densidad real, por el método del picnómetro (Baver, 1973).
5. Porcentaje de espacio poroso, a partir de las densidades aparente y real.
6. Textura, por el método del hidrómetro de Bouyoucos (1963), en el cual las muestras se trataron con peróxido de hidrógeno al 8%, secando en "baño de maría", y como dispersantes el metasilicato y oxalato de sodio al 5 %.

6.2.2. Propiedades Químicas

1. pH por medio del Potenciómetro Corning Modelo 7, con una relación suelo agua destilada 1:5 y 1:10 y con una solución salina de KCl 1N pH 7 en la misma relación 1:5 y 1:10.
2. Materia orgánica, por el método de Walkley y Black, modificado por Walkley (1947).
3. Carbono, multiplicando la materia orgánica por 0.58 o dividiéndola entre 1.724 (Jackson, 1982).
4. Calcio y magnesio intercambiables, por el método de centrifugación, empleando acetato de amonio 1N pH 7. El calcio y el magnesio eluidos se determinan por el método del Versenato (Jackson, 1982).
5. Potasio y sodio intercambiables por flamometría, empleando acetato de amonio 1N pH 7 para la extracción.
6. Capacidad de intercambio catiónico, por el método de centrifugación, saturando con CaCl_2 1N pH 7, lavando con alcohol etílico y eluyendo con NaCl 1N pH 7, titulando con EDTA 0.02N (Jackson, 1982).
7. Pasta de saturación, en la que la extracción de la solución del suelo mediante filtración.
8. Conductividad eléctrica de la solución del suelo mediante un puente de conductividad (Jackson, 1982).
9. pH del extracto de la solución del suelo por el método potenciométrico.
10. Calcio y magnesio solubles por el método volumétrico, en el que se efectúa la titulación por el método del Versenato (EDTA 0.02 N) (Cheng y Bray, 1951).
11. Sodio y potasio solubles por Espectroflamometría (Jackson, 1982).
12. Cloruros, utilizando AgNO_3 (0.01N) e indicador $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (5%) (Jackson, 1982).

13. Sulfatos por gravimetría en forma de BaSO₄ (Bower y Huss, 1948).
14. Carbonatos y bicarbonatos por el método volumétrico (Reitemeier, 1943), se utilizó HCl (0.1 N), fenolftaleína y anaranjado de Metilo.
15. Porciento de sodio intercambiable (PSI). Relación de la capacidad de intercambio catiónico y sodio intercambiable.

6.2.2.1. Metales extractables en suelos

Los metales extractables, Fe, Cu, Mn, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd se extrajeron con DTPA-TEA-CaCl₂ (Lindsay y Norvell, 1978) y leyeron por espectrofotometría de absorción atómica con un equipo Perkin-Elmer Modelo 2380; los análisis se hicieron por duplicado empleando agua desionizada.

6.2.2.2. Metales totales en suelos

Metales totales Fe, Cu, Mn, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd, se cuantificaron mediante la técnica de origen nuclear (TAON) y que en inglés se denomina "PIXE" (particle induced X-ray emission), que consiste en el bombardeo de un sólido (muestra) con un flujo (haz) de iones (protones, deuterones, alfas, etc.) con energía de 2 a 3 MeV, producidos por un acelerador de partículas Van de Graaff de 5.5 MV del Instituto de Física, UNAM (IFUNAM). El resultado de la colisión con los núcleos atómicos y electrones de la muestra, produce choques elásticos, reacciones nucleares, Rayos X característicos de los elementos de la muestra, rayos gamma, etc. La energía de estos rayos X es medida con un detector criogénico de Si con impurezas de Li, lo cual se mide con un convertidor analógico digital como un espectro de altura de pulsos.

Este espectro, cuando se calibra en energía constituye lo que se conoce como espectro de energía de Rayos-X. Cada uno de estos espectros es almacenado en un disco magnético de una computadora PC, los cuales son analizados usando un programa denominado GUPIX (Maxwell *et al.*, 1995). El resultado de este análisis deduce la composición elemental de la muestra, expresado en mg L⁻¹ para elementos traza o bien en % para elementos mayoritarios.

6.3. DE INVERNADERO

El experimento a nivel de invernadero se diseñó con el propósito de cuantificar los niveles de metales pesados que fueron absorbidos al aplicar concentraciones altas y bajas de Pb y Ni a la planta de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*). Para esto, se empleó el suelo del P-7 de la zona chinampera de Tláhuac por presentar problemas de salinidad y sodicidad muy elevados. Las muestras de suelo fueron tomadas de la capa de 0 a 20 cm y posteriormente transportadas en costales y llevadas al invernadero para ser secadas al aire y molerlas empleando un mortero de madera, con el objeto de homogeneizar las partículas del suelo.

Las muestras de suelo se tamizaron empleando un tamiz de 4 mm de abertura. Se emplearon macetas de plástico con perforaciones las cuales se cubrieron con papel filtro con el objeto de evitar la pérdida de suelo por efecto de percolación empleando 2,100 g de suelo para cada maceta.



Figura 6.2. Desarrollo de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) a los 35 días después de la siembra.



Figura 6.3. Desarrollo de la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) con los tratamientos 1 (0-0-0) y 13 (30-500-0).

6.3.1. Niveles de concentración de composta, plomo y níquel aplicados al suelo de invernadero

Se aplicó un diseño trifactorial de arreglo combinatorio con una distribución completamente al azar con 4 repeticiones, empleando 18 tratamientos (Cuadro 6.1), haciendo un total de 72 unidades experimentales (2x3x3x4) tal como se indica a continuación:

Composta de *Casuarina equisetifolia* L.: 0 y 30 mg kg⁻¹

Plomo en forma de Pb(NO₃)₂: 0, 500 y 1000 mg kg⁻¹

Níquel en forma de NiSO₄·6H₂O: 0, 500 y 1000 mg kg⁻¹

Los metales en solución Pb(NO₃)₂, NiSO₄·6H₂O y composta de *Casuarina equisetifolia* L., se aplicaron el día 29 de diciembre de 1997 e inmediatamente la macetas se cubrieron con un plástico para que se llevara a cabo la incubación durante 10 días. Una vez pasados los 10 días, se secaron los suelos y tomaron 100 g para cuantificar los metales traza (Fe, Cu, Mn, Zn) y metales pesados (Pb, Ni, Cr, Cd) extractables empleando DTPA-TEA-CaCl₂ (Lindsay y Norvell, 1978) y totales (método PIXE).

Posteriormente se llevó a cabo la siembra (12 de marzo de 1998) colocando 10 semillas de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) en cada maceta; a los 7 días comenzó la emergencia de las plántulas. El aclareo se hizo a los 15 días dejando las plantas más vigorosas (4) y mejor ubicadas dentro de la maceta.

Durante el desarrollo del experimento se regó a capacidad de campo. Las labores de limpieza consistieron en quitar las malas hierbas que emergían dentro de la maceta.

6.3.2. Colecta y análisis del material vegetal.

A los 70 días de la siembra (21 de mayo de 1998) se procedió a medir la longitud de las plantas, ancho y número de hojas; posteriormente se realizó la cosecha. Una vez efectuado el corte, se procedió el lavado, que consistió en lavar las plantas completas (parte comestible y raíz) en agua destilada y agua desionizada.

Una vez lavadas y perfectamente escurridas las plantas, se guardaron en bolsas de papel debidamente etiquetadas, para colocarlas en la estufa a una temperatura de 65°C durante 72 horas, y de esa forma determinar el peso seco.

Posterior a la cosecha se tomaron nuevamente 100 g de suelo para cuantificar los metales traza (Fe, Cu, Mn, Zn) y metales pesados (Pb, Ni, Cr, Cd) extractables empleando DTPA-TEA-CaCl₂ (Lindsay y Norvell, 1978) y totales por el método PIXE (Andrade, 1998; Miranda, 2000).

Las plantas se molieron en un molino eléctrico Wiley, empleando una malla del No. 20. Las muestras molidas, se guardaron en recipientes de plástico. A continuación las plantas ya molidas se

digestaron empleando una mezcla de $\text{HClO}_4\text{-HNO}_3$ (1:4) (Tserling, 1969) para cuantificar los metales traza (Fe, Cu, Mn y Zn) y metales pesados (Pb, Ni, Cr y Cd) en el follaje.

La concentración de metales traza (Fe, Cu, Mn, Zn) y metales pesados (Pb, Ni, Cr, Cd) se determinó por espectrofotometría de absorción atómica con un equipo Perkin-Elmer Modelo 2380. Se utilizó agua desionizada en el procedimiento analítico y se corrió un blanco.

Cuadro 6.1. Concentraciones de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, $\text{NiSO}_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y composta de *Casuarina equisetifolia* L. empleadas en el diseño experimental de invernadero

Número	Tratamientos		
	C	Pb	Ni
	mg kg ⁻¹		
1	0	0	0
2	0	0	500
3	0	0	1000
4	0	500	0
5	0	500	500
6	0	500	1000
7	0	1000	0
8	0	1000	500
9	0	1000	1000
10	30	0	0
11	30	0	500
12	30	0	1000
13	30	500	0
14	30	500	500
15	30	500	1000
16	30	1000	0
17	30	1000	500
18	30	1000	1000

C = Composta

6.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los parámetros físicos y químicos, junto con los metales traza y metales pesados extractables y totales se sometieron a un análisis de correlación múltiple de Pearson determinándose así el grado de asociación entre las variables y su significancia estadística.

Además se practicó un Análisis de Varianza a las variables como peso seco, longitud de la planta, ancho de la hoja, número de hojas, contenido de metales traza, y metales pesados extractables y totales en suelos y en plantas.

Se aplicó el análisis de comparaciones múltiples por el Método de Tukey. Se empleó el programa Statistica v. 6.0 (Statiscal Soft. Inc. 1999) y el programa Statiscal Analisis System v. (Statiscal Sofá. Inc. 1999-2001).

Se utilizaron las técnicas de regresión para el modelo lineal $y=ax+b$. Este método se aplicó para establecer la relación funcional $STD= aCE$, cationes $meq \cdot L^{-1} = aCE$ y aniones $meq \cdot L^{-1} = aCE$.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS PERFILES DE SUELOS DE CHINAMPAS.

7.1.1. Xochimilco

Los resultados de las propiedades físicas y químicas de los perfiles P-1 y P-2 se muestran en los Cuadros 7.1. y 7.3.

Los resultados de cationes y aniones solubles de los perfiles P-1 y P-2 se muestran en los Cuadros 7.2. y 7.4.

La distribución gráfica de ambos perfiles se muestra en las Figuras 7.1. y 7.2.

La matriz de correlaciones de Pearson de ambos perfiles se presenta en el Apéndice A, Cuadros A1 y A2.

Los resultados de las concentraciones de los tipos de sales de los perfiles P-1 y P-2 se muestran en el Apéndice B, Cuadros B1 y B2.

La distribución gráfica de los tipos de sales de los 2 perfiles se muestran en la Figura 7.18.

El color del suelo tanto del P-1 y P-2 del sitio 1 va de gris 10YR 5/1 a gris oscuro 10YR 4/1 en seco y en húmedo negro 10YR 2/1 y 7.5YR 2/0. El color negro se debe a la presencia de la materia orgánica, principalmente a las formas moleculares de ácidos húmicos y debido a que se tiene una elevada melanización y a un alto peso molecular, además se tiene la presencia de carbonato sódico en los suelos alcalinos. Esta particularidad hace que se tengan tintes negros en los suelos debido a la alta solubilidad del humus en álcalis.

La DA en los P-1 y P-2 va de 0.42 y 0.43 Mg m⁻³ en las capas más profundas a 0.57 y 0.61 Mg m⁻³ en las capas superficiales; estos se puede observar claramente en el análisis de correlaciones en el Cuadro A1 y A2, que existe una correlación negativa con respecto a la profundidad en ambos perfiles; esto se explica con la presencia alta de sustancias húmicas.

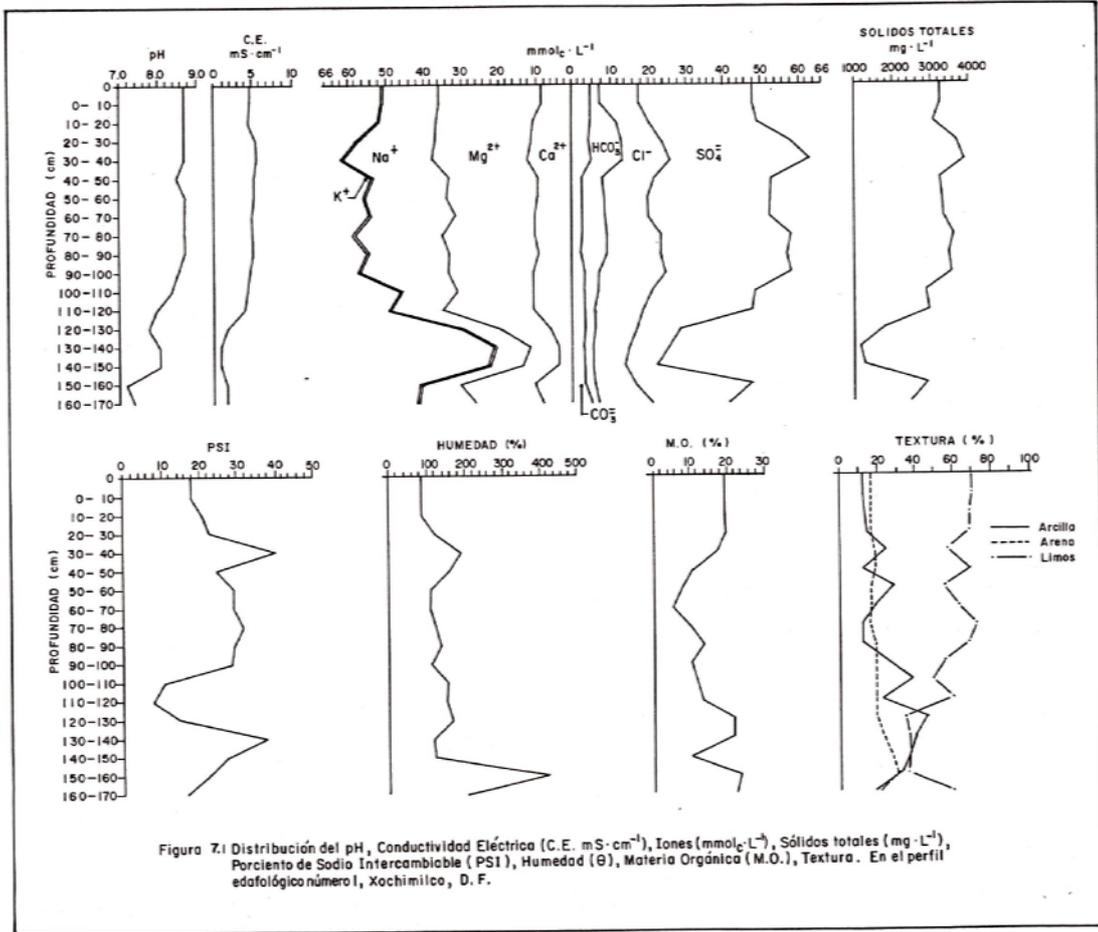
A medida que aumenta la profundidad, la porosidad y la materia orgánica, la DA tiende a disminuir.

La DR fue más baja en el P-2 que en el P-1, esto se debe a que hay más aporte de materia orgánica en el P-2, y una mayor actividad en el manejo del suelo presentando una gran diversidad de cultivos como: rábano *Rhapanus sativus* L., betabel *Beta vulgaris* var. *crassa* Alef., maíz *Zea mays* L., romero *Suaeda difusa* S. Watson, lechuga *Lactuca sativa* L., coliflor *Brassica oleracea* L. var. *botrytis* y brócoli *Brassica oleracea* L.

El % porosidad es mayor en el P-1 que en el P-2, obteniendo valores de 80.08 y 82.36% en los 170 y 130 cm de profundidad respectivamente. En el P-2 existe una correlación positiva con la materia orgánica. La alta porosidad facilita el enraizamiento, asegura la conservación del agua y favorece los intercambios entre la planta y el suelo permitiendo la difusión del aire y del agua.

Cuadro 7.1. Propiedades físicas y químicas del P-1 Xochimilco, D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Color						Textura					pH				Cationes Intercambiables				
		Seco	Húmedo	H	D.A.	D.R.	Por.	Ar	Li	Arc	M.O.	C	H ₂ O		KCl		CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
				%	Mg m ⁻³	%	%			%		1:5	1:10	1:5	1:10	cmol(+)kg ⁻¹					
1	0-10	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	83.39	0.57	2.09	72.47	17.3	70.1	12.6	19.81	11.49	8.4	8.6	8.1	8.3	71.72	62.99	56.69	12.90	1.76
2	10-20	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	84.54	0.56	2.10	73.10	16.7	69.5	13.8	19.81	11.49	8.4	8.5	8.0	8.3	71.19	63.52	53.02	15.06	0.94
3	20-30	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	112.40	0.58	2.11	72.22	16.7	69.1	14.1	20.15	11.69	8.7	8.8	8.3	8.6	74.89	72.97	60.02	17.31	0.62
4	30-40	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	119.17	0.53	2.06	73.99	19.0	57.0	24.0	17.89	10.37	9.0	9.2	8.5	8.7	53.69	34.65	54.59	21.54	0.76
5	40-50	10YR 6/1 Gris claro	10YR 2/1 Negro	115.98	0.51	2.14	75.99	18.6	68.5	13.0	11.10	6.43	9.0	9.2	8.3	8.5	52.47	26.56	38.53	12.90	0.67
6	50-60	10YR 6/1 Gris claro	10YR 2/1 Negro	108.07	0.52	2.13	75.40	17.4	55.1	27.6	8.28	4.80	9.0	9.2	8.2	8.4	43.69	22.15	34.65	12.90	0.71
7	60-70	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	106.94	0.54	2.10	74.15	17.0	64.4	18.6	7.93	4.60	9.0	9.2	8.2	8.3	47.55	19.95	37.65	14.19	0.80
8	70-80	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	128.29	0.47	2.12	77.79	16.4	71.8	12.0	10.61	6.15	9.1	9.3	8.3	8.5	44.52	27.82	37.80	14.19	0.80
9	80-90	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	141.47	0.49	2.10	76.39	19.3	68.8	11.9	14.03	8.13	9.1	9.3	8.4	8.6	54.02	32.55	45.14	15.95	0.89
10	90-100	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	123.18	0.46	2.04	77.19	19.3	55.9	24.8	11.24	6.51	9.0	9.2	9.3	8.4	47.04	29.40	34.33	13.76	1.17
11	100-110	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	135.89	0.44	1.99	77.68	18.6	44.8	36.6	12.49	7.24	8.3	8.4	7.6	7.7	44.71	17.85	25.20	5.15	1.86
12	110-120	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	147.05	0.42	2.03	79.44	18.9	59.9	22.2	13.96	8.09	7.0	7.1	6.5	6.6	47.19	12.07	14.70	4.16	0.80
13	120-130	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	171.36	0.39	2.20	82.36	19.7	33.9	46.4	22.26	12.91	6.6	6.8	6.0	6.2	52.27	21.00	29.92	7.67	1.71
14	130-140	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	121.88	0.43	2.98	78.20	23.0	36.6	40.4	22.05	12.79	6.7	6.9	6.0	6.1	48.67	37.27	49.87	18.70	1.08
15	140-150	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	121.79	0.57	2.04	71.88	26.7	36.7	36.6	11.05	6.40	6.9	7.1	6.2	6.3	38.20	28.14	28.35	10.81	1.76
16	150-160	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	424.75	0.56	2.15	73.85	30.4	35.9	33.7	23.67	13.73	6.3	6.5	5.8	5.9	46.58	27.72	27.93	10.81	1.56
17	160-170	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	203.89	0.42	2.13	80.08	22.2	58.8	19.0	23.26	13.49	7.0	6.7	6.4	6.5	45.34	28.35	26.25	7.67	1.71



Cuadro 7.2. Composición iónica del extracto de saturación del P-1 Xochimilco, D.F.

Muestra	Profundidad	pH	C.E	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	SUMA	PSI
No.	cm		mS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹								mmol _e L ⁻¹	mg L ⁻¹		
1	0-10	8.7	4.9	9.64	26.31	14.35	0.14	50.44	4.32	7.56	10.06	29.98	51.92		17.99
				193.19	319.67	330.05	5.47		129.60	461.16	356.62	1 439.94		3 236	
2	10-20	8.7	4.8	10.60	25.90	14.08	0.19	50.77	4.33	6.49	9.17	29.03	49.02		21.15
				212.42	314.69	323.84	7.43		129.90	395.89	325.08	1 394.31		3 104	
3	20-30	8.7	5.5	11.56	25.28	20.27	0.13	57.24	4.20	9.45	10.25	34.38	58.28		23.11
				231.66	307.15	466.21	5.08		126.00	576.45	363.36	1 651.27		3 727	
4	30-40	8.5	5.6	12.50	24.94	23.45	0.18	61.07	4.93	8.62	12.27	37.09	62.91		40.12
				250.50	303.02	539.35	7.04		147.90	525.82	434.97	1 781.43		3 990	
5	40-50	8.5	5.3	9.54	23.62	20.22	0.15	53.53	2.54	6.35	11.92	32.24	53.05		24.59
				191.18	286.98	465.06	5.87		76.20	387.35	422.56	1 548.49		3 379	
6	50-60	8.7	5.2	9.93	24.09	20.39	0.18	54.59	2.69	5.38	12.00	32.88	52.95		29.53
				198.99	292.69	468.97	7.04		80.70	328.18	425.40	1 579.23		3 381	
7	60-70	8.7	5.0	10.27	21.63	21.99	0.18	54.07	2.80	5.60	12.12	32.40	52.92		29.84
				205.81	262.80	505.77	7.04		84.00	341.60	429.65	1 556.17		3 393	
8	70-80	8.7	5.2	10.33	24.38	22.94	0.18	57.83	2.93	5.87	15.09	34.42	58.31		31.87
				207.01	296.21	527.62	7.04		87.90	358.07	534.94	1 653.19		3 672	
9	80-90	8.7	5.3	9.72	23.57	20.99	0.24	54.52	2.74	6.85	13.87	33.34	56.80		29.53
				194.79	286.38	482.77	9.38		82.20	417.85	491.69	1 601.32		3 566	
10	90-100	8.5	4.9	10.62	23.23	22.22	0.34	56.41	3.15	6.31	15.25	33.25	57.96		29.25
				212.82	282.24	511.06	13.29		94.50	384.91	540.61	1 596.99		3 636	
11	100-110	8.4	4.5	10.59	20.36	14.33	0.57	45.85	3.04	4.56	13.29	27.74	48.63		11.52
				212.22	247.37	329.59	22.29		91.50	278.16	471.13	1 332.35		2 984	
12	110-120	8.0	4.2	10.81	23.81	14.18	0.68	49.48	3.19	3.19	12.06	29.70	48.14		8.82
				216.63	289.29	326.14	26.59		95.70	95.70	427.53	1 426.49		2 094	
13	120-130	7.9	2.8	6.17	12.51	10.82	0.71	30.21	3.51	2.81	10.66	12.34	29.32		14.67
				123.65	151.99	248.86	27.76		105.30	171.41	377.90	592.69		1 800	
14	130-140	8.1	2.0	3.63	7.62	9.47	0.67	21.39	3.29	2.96	8.12	7.33	21.70		38.42
				72.74	92.58	217.81	26.20		98.70	160.43	322.24	277.61		1 329	
15	140-150	8.1	2.0	3.64	9.57	8.82	0.63	22.66	3.29	2.96	8.12	7.33	21.70		28.30
				72.95	116.28	202.86	24.63		98.70	180.56	287.85	352.06		1 336	
16	150-160	7.6	3.9	10.00	22.86	12.79	0.80	46.45	3.57	2.83	10.12	31.19	47.71		23.21
				200.40	277.75	294.17	31.28		107.10	172.63	358.75	1 498.06		2 939	
17	160-170	7.7	3.5	7.70	19.26	13.12	0.79	40.87	4.52	3.17	13.38	20.94	42.01		16.92
				154.31	234.01	301.76	30.89		135.60	193.37	474.32	1 005.75		2 530	

La clase textural en el P-1 va de migajón limoso, migajón arcilloso, migajón arcillo limoso a través de todo el perfil. Y en el P-2 es franco dominando el migajón arcilloso. Estas diferencias se deben a los altos porcentajes de limos y arcillas.

El pH con H₂O en 1:5 en el P-1 va de ligeramente ácido 6.3 y fuertemente alcalino 9.1; mientras que en el P-2 es moderadamente ácido 5.2 y moderadamente alcalino 8.5.

El pH con H₂O en la relación 1:10 en el P-1 va de 6.5 y 6.7 ligeramente ácido en las capas más profundas a fuertemente alcalino 9.2 y 9.3 en las capas intermedias de 30 a 100 cm. En el P-2 el pH con H₂O en 1:10 es de 5.5 y 5.6 moderadamente ácido en las capas más profundas de 100 a 120 cm a 8.6 moderadamente alcalino de 0 a 40 cm.

La CIC en el P-1 fue más alta con valores que fluctúan de 71.19 a 74.89 cmol(+)kg⁻¹ en las capas superficiales, mientras que en el P-2 los valores fluctúan de 61.70 y 59.49 cmol(+)kg⁻¹ de 0 a 20 cm.

Los contenidos de Ca²⁺ intercambiable de 0 a 30 cm fueron más altos en el P-1 con valores que fluctúan de 62.99 a 72.97 cmol(+)kg⁻¹ de 0 a 30 cm, mientras que en el P-2 fue de 69.99 a 57.50 cmol(+)kg⁻¹.

El Mg²⁺ intercambiable es más alto en el P-1 de 0 a 40 cm con valores de 53.02 a 60.58 cmol(+)kg⁻¹ y en el P-2 a la misma profundidad de 26.52 a 38.76 cmol(+)kg⁻¹.

El Na⁺ intercambiable es más alto en el P-1 de 0 a 40 cm con valores que fluctúan de 12.90 a 21.54 cmol(+)kg⁻¹ y disminuye conforme aumenta la profundidad (10.81 y 7.67 cmol(+)kg⁻¹). Mientras que en el P-2 va de 11.73 hasta 5.19 cmol(+)kg⁻¹.

En el P-1 el K⁺ intercambiable va de 0.62 a 1.76 cmol(+)kg⁻¹ de 0 a 40 cm de profundidad, mientras que en el P-2 es de 0.29 a 0.63 cmol(+)kg⁻¹ a la misma profundidad. Estos valores disminuyen en las partes intermedias en ambos perfiles y aumentan conforme aumenta la profundidad.

La CE en el P-1 va de 4.9 a 5.5 mS cm⁻¹ en las capas superficiales, hasta 3.5 mS cm⁻¹ en las capas más profundas y en el P-2 de 6.1 y 5.8 mS cm⁻¹ en las capas superficiales; 3.5 y 3.2 mS cm⁻¹ en las capas intermedias y 6.4 mS cm⁻¹ en la capa más profunda.

Con relación a los cationes solubles se puede mencionar que los iones Na⁺ oscilan de 8.82 mmol_c L⁻¹ en el P-1 hasta 33.58 mmol_c L⁻¹ en el P-2. El ión Mg²⁺ es el valor más alto en el P-2 con un valor de 42.46 mmol_c L⁻¹. El valor más alto del ión Ca²⁺ es de 17.69 mmol_c L⁻¹ en el P-2. El valor más alto de K⁺ es de 0.80 mmol_c L⁻¹ en el P-1. Los valores más altos de SO₄²⁻ se presentan en el P-2 con 60.38 mmol_c L⁻¹. El valor más alto de Cl⁻ es de 19.94 mmol_c L⁻¹ en el P-2. Los contenidos de CO₃²⁻ y HCO₃⁻ más altos se presenta en el P-2 con valores de 8.99 y 16.88 mmol_c L⁻¹ respectivamente.

El PSI es más alto en el P-1 con valores que oscilan de 17.99 a 40.12 de 0 a 40 cm hasta 38.42 de 130 a 140 cm de profundidad.

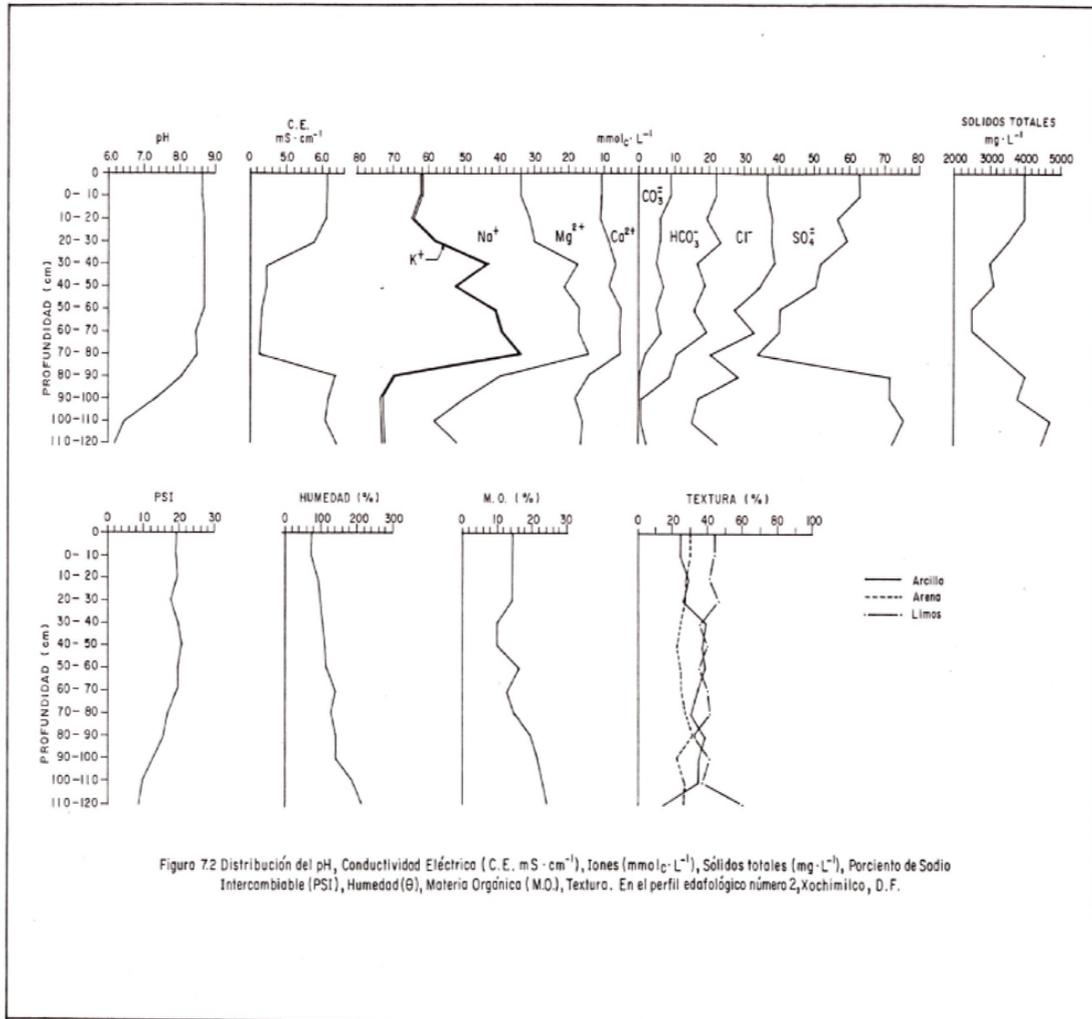


Figura 7.2 Distribución del pH, Conductividad Eléctrica (C.E. $mS \cdot cm^{-1}$), Iones ($mmol \cdot L^{-1}$), Sólidos totales ($mg \cdot L^{-1}$), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), Humedad(θ), Materia Orgánica (M.O.), Textura. En el perfil edafológico número 2, Xochimilco, D.F.

Cuadro 7.4. Composición iónica del extracto de saturación del P-2 Xochimilco, D.F.

Muestra No	Profundidad cm	pH	C.E. 1 mS cm	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	SUMA	PSI
				mmolc L ⁻¹								mmolc L ⁻¹	mg L ⁻¹		
18	0-10	8.6	6.1	10.18	23.31	28.26	0.38	62.13	8.99	13.48	15.57	25.99	64.03		19.01
				204.01	283.22	649.98	14.86		269.70	822.28	551.96	248.30		4 044	
19	10-20	8.7	6.1	10.89	19.99	33.58	0.41	64.87	6.21	13.66	18.04	28.73	66.64		19.72
				218.24	242.88	772.34	16.03		186.30	833.26	639.52	379.90		4 289	
20	20-30	8.7	5.8	8.64	21.2	28.26	0.36	58.46	6.49	16.88	14.57	21.69	59.63		18.03
				173.15	257.58	649.98	14.08		194.70	1 029.68	516.51	768.91		3 605	
21	30-40	8.7	4.4	6.53	12.47	26.12	0.14	45.26	5.67	12.06	21.06	7.29	46.08		20.43
				130.86	128.79	600.76	5.47		170.10	735.66	746.58	513.67		3 032	
22	40-50	8.7	4.9	8.05	12.93	31.50	0.09	52.57	7.09	12.05	15.45	16.40	50.99		20.59
				161.32	157.10	724.50	3.52		212.70	735.05	547.70	581.38		3 123	
23	50-60	8.7	3.8	5.54	10.90	25.33	0.12	41.89	5.33	10.67	11.44	13.13	40.57		19.55
				111.02	132.43	582.59	4.69		159.90	650.87	405.55	465.46		2 513	
24	60-70	8.5	3.5	5.92	11.64	22.80	0.13	40.49	6.78	12.71	14.54	7.25	41.28		19.84
				118.64	132.43	524.40	5.08		203.40	775.31	515.44	257.01		2 532	
25	70-80	8.5	3.2	5.29	8.92	19.06	0.13	33.40	2.15	9.14	9.23	13.82	34.34		17.03
				106.01	108.38	438.38	5.08		64.50	557.54	327.20	489.92		2 097	
26	80-90	8.1	6.4	14.05	25.86	30.04	0.18	70.13	0.00	9.09	19.82	42.84	71.75		15.55
				281.56	314.20	690.92	7.04		0.00	554.49	702.62	518.68		4 070	
27	90-100	7.3	6.2	17.69	32.59	22.75	0.31	73.34	0.00	1.27	16.12	54.30	71.69		12.94
				354.51	395.97	523.25	12.12		0.00	77.47	571.45	924.94		3 860	
28	100-110	6.4	6.1	15.59	42.46	18.34	0.59	76.98	0.00	1.21	14.26	60.38	75.85		10.38
				312.42	515.89	421.82	23.07		0.00	73.81	505.52	900.05		4 753	
29	110-120	6.2	6.4	17.15	35.32	20.22	0.73	73.42	0.00	2.43	19.94	50.15	72.52		9.61
				343.69	429.14	465.06	28.54		0.00	148.23	706.87	408.70		4 530	

El pH del extracto de saturación tiene una correlación positiva con los contenidos de Na⁺ intercambiable; esto se debe a que en condiciones alcalinas los contenidos de sodio corresponden a las sales de NaHCO₃ y Na₂CO₃. El ión Ca²⁺ en condiciones alcalinas se precipita en forma de CaCO₃.

En el P-2 el PSI fluctúa de 18.03 a 20.59 en los primeros 50 cm hasta valores de 9.61 a 15.55 de 80 a 120 cm. En el P-2 existe una alta correlación con los contenidos de Na⁺ intercambiable; esto se debe a que las soluciones salinas del P-2 tienen una mayor concentración de iones de Na⁺.

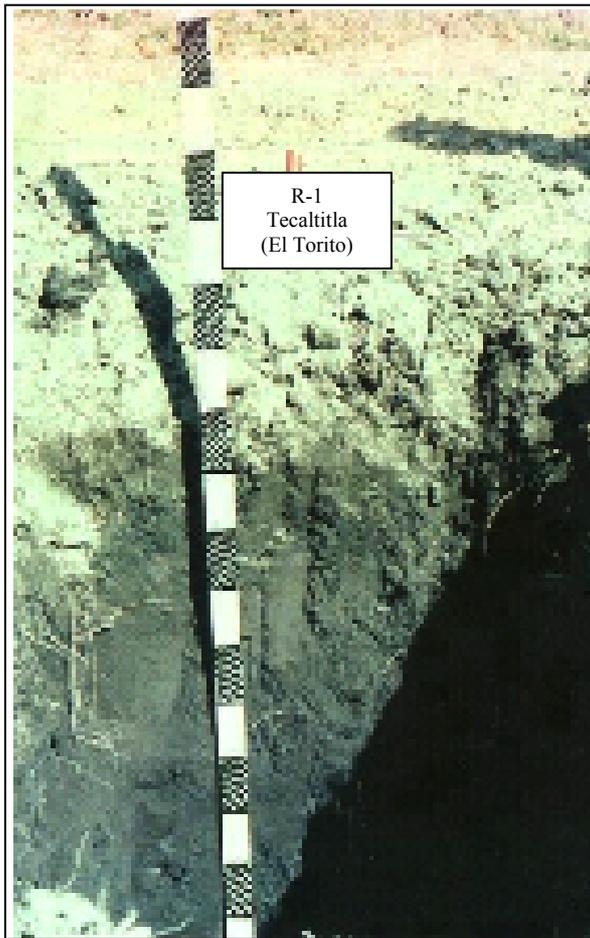


Figura 7.3 Vista morfológica del P-1 localizado en Tecaltitla, Xochimilco, D.F. No hay diferenciación de horizontes.

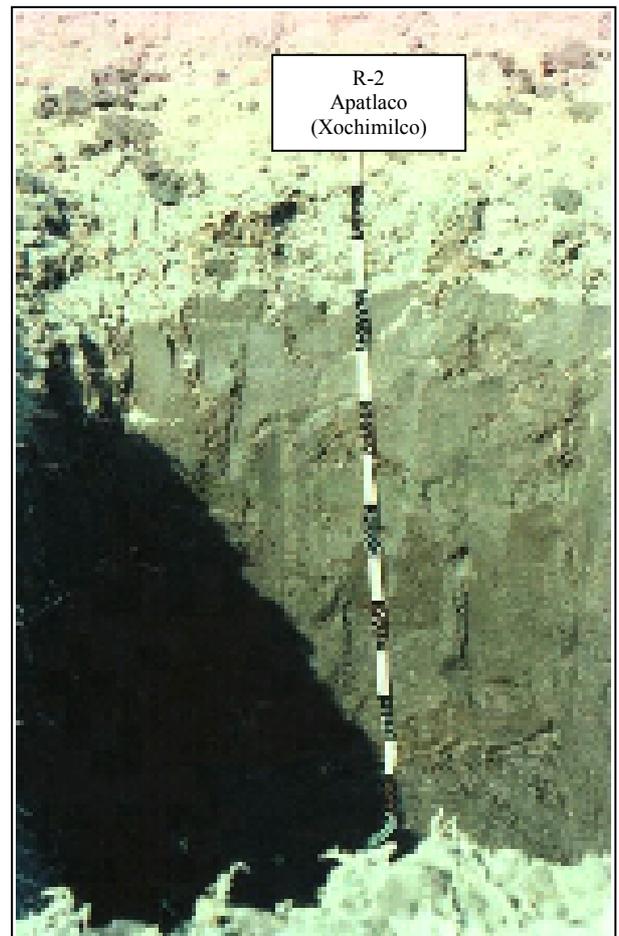


Figura 7.4. Vista morfológica del P-2 localizado en el canal de Apatlaco, Xochimilco, D. F. Profundidad de 120 cm.

De acuerdo al Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, los perfiles de suelos P-1 y P-2 se caracterizan por ser suelos salinos-sódicos de 0 a 100 cm en el primero y de 0 a 50 cm de profundidad en el segundo con una CE >4 mS cm^{-1} y PSI > 15 ; salinos de 100 a 120 cm en el P-1 y de 90 a 120 cm en el P-2; por presentar una CE > 4 mS cm^{-1} ; sódicos de 130 a 170 cm en el P-1 y de 50 a 80 cm en el P-2 por presentar un PSI > 15 .

Con relación a los tipos de sales en los perfiles P-1 y P-2 se tienen sales sódicas y sales neutras. Las sales sódicas como el NaHCO_3 y Na_2CO_3 son de considerable concentración. En cuanto a las sales neutras, el contenido de MgSO_4 es mayor que el contenido de NaCl .

7.1.2. San Luís Tlaxialtemalco

Los resultados de las propiedades físicas y químicas de los perfiles P-3, P-4 y P-5 se muestran en los Cuadros 7.5., 7.7. y 7.9.

Los resultados de cationes y aniones solubles de los perfiles P-3, P-4 y P-5 se muestran en los Cuadros 7.6., 7.8. y 7.10.

La distribución gráfica de los 3 perfiles se muestra en las Figuras 7.5., 7.6. y 7.7.

La matriz de correlaciones de Pearson se muestra en el Apéndice A, Cuadros A3, A4 y A5.

Los resultados de las concentraciones de los tipos de sales en los perfiles P-3, P-4 y P-5 se muestran en el Apéndice B, Cuadros B3, B4 y B5.

La distribución gráfica de los tipos de sales de los 3 perfiles se muestra en la Figura 7.18.

El color del suelo en los perfiles P-3, P-4 y 5 va de gris 10 YR 5/1; gris oscuro 10 YR 4/1; pardo grisáceo 10 YR 5/2; gris pardusco claro 10YR 6/2; pardo pálido 10YR 6/3; gris claro 10YR 7/1; gris 10YR 5/1; y blanco 10YR 8/1 en seco y en húmedo negro 10YR 2/1; pardo muy oscuro 10YR 2/2; gris muy oscuro 10YR 3/1; pardo grisáceo muy oscuro 10YR 3/2 y pardo oscuro 10YR 3/3.

El color blanco se debe a la presencia de polimorfos de sílice de origen biogénico constituidos principalmente por diatomeas, fitolitos y a la mineralogía con abundancia de feldespatos y cuarzo procedentes de eventos volcánicos durante el cuaternario, a la ausencia de compuestos melanizados de materia orgánica y de óxidos e hidróxidos de Fe (García *et al.*, 1994). El color negro se debe a la presencia de materia orgánica.

Con respecto al contenido de humedad, se puede observar un mayor porcentaje en el perfil P-5 con valores que van de 58.11 y 82.82 % en las capas superficiales, hasta 260.39 y 277.34% en las capas más profundas, originado por la alta saturación de humedad (nivel freático).

Le sigue el P-3 que va de 53.56, a 213.86% en las capas más profundas. En los perfiles P-3, P-4 y P-5 muestran una correlación positiva con respecto a la profundidad; esto se debe a un aumento de los minerales amorfos. Ver Cuadros A3, A4 y A5. En los perfiles P-4 y P-5 se presentan correlaciones negativas con los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ intercambiables; con el pH del extracto de saturación y la CE, esto se debe a los procesos de ascenso capilar de las soluciones salinas.

La DA más alta se presenta en el P-4 con valores que van de 0.70 a 0.73 Mg m⁻³ en los primeros 30 cm y de 0.41 a 0.47 Mg m⁻³ en las capas más profundas; éstos valores altos probablemente se debe a la presencia de algunos feldespatos y cuarzo.

En el P-5 la DA varió de 0.55 y 0.53 Mg m⁻³ en los primeros 30 cm hasta 0.24 y 0.20 en las capas más profundas. Como puede observarse la DA en los 3 perfiles disminuye con la profundidad debido a los altos niveles de materia orgánica y minerales amorfos.

Cuadro 7.5. Propiedades físicas y químicas del P-3 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Color						Textura					pH				Cationes Intercambiables				
		Seco	Húmedo	H	D.A.	D.R.	Por.	Ar	Li	Arc	M.O.	C	H ₂ O		KCl		CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
				%	Mg m ⁻³	%	%			%		1:5		1:10		cmol(+)kg ⁻¹					
30	0-10	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	53.56	0.69	1.89	63.41	21.8	60.4	17.8	8.82	5.11	8.5	8.6	8.2	8.2	70.7	84.87	59.59	65.21	2.26
31	10-20	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	60.04	0.63	1.73	63.58	20.0	68.2	11.8	8.04	4.66	8.5	8.5	8.1	8.1	59.79	81.18	38.38	21.73	1.47
32	20-30	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	68.03	0.62	1.97	68.58	26.0	64.2	9.8	8.84	5.14	8.6	8.6	8.1	8.1	52.72	76.26	34.34	19.34	1.09
33	30-40	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	69.74	0.59	1.87	68.44	21.8	70.2	8.0	8.54	4.95	8.6	8.6	8.1	8.1	49.08	76.26	34.34	15.86	1.20
34	40-50	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	77.69	0.61	1.84	66.44	22.0	72.0	6.0	8.54	4.95	8.5	8.6	8.1	8.1	46.05	75.03	26.26	12.82	0.90
35	50-60	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	83.91	0.52	1.89	72.49	21.8	44.2	34.0	8.54	4.95	8.5	8.7	7.8	7.8	43.83	40.59	18.18	10.00	0.69
36	60-70	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	91.41	0.56	1.86	69.89	21.8	44.2	34.0	12.72	7.37	8.5	8.7	8.1	7.9	45.06	41.82	25.25	10.00	0.60
37	70-80	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	130.07	0.52	1.79	70.94	32.0	42.0	26.0	31.65	18.35	8.1	8.2	7.6	7.6	86.88	70.11	54.54	14.78	0.48
38	80-90	10YR 3/1 Gris muy osc.	10YR 2/1 Negro	213.97	0.48	1.73	72.94	32.0	42.0	26.0	37.68	21.85	7.7	7.8	7.3	7.3	120.78	83.64	72.72	12.39	0.53
39	90-100	10YR 4/1 Gris osc.	10YR 2/1 Negro	216.18	0.45	1.73	73.94	38.0	38.0	24.0	39.36	22.83	7.7	7.8	7.3	7.3	98.45	71.34	58.58	13.47	0.48
40	100-110	10YR 4/1 Gris osc.	10YR 2/1 Negro	183.23	0.45	1.54	70.94	34.0	48.0	18.0	29.64	17.19	7.7	7.8	7.3	7.2	68.45	49.20	39.39	10.87	0.56
41	110-120	10YR 4/1 Gris osc.	10YR 2/1 Negro	175.63	0.40	1.24	67.74	25.7	38.7	35.6	28.47	16.51	7.6	7.7	7.2	7.1	72.47	51.66	40.40	10.87	0.56
42	120-130	10YR 6/1 Gris	10YR 2/1 Negro	213.86	0.30	1.99	84.92	19.8	68.4	11.8	15.74	9.13	7.8	7.9	7.4	7.2	48.51	34.44	34.34	11.52	0.60
43	130-140	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	168.39	0.40	2.02	80.19	29.8	64.4	5.8	13.06	7.57	7.8	7.9	7.3	7.1	38.77	28.29	27.27	10.43	0.90

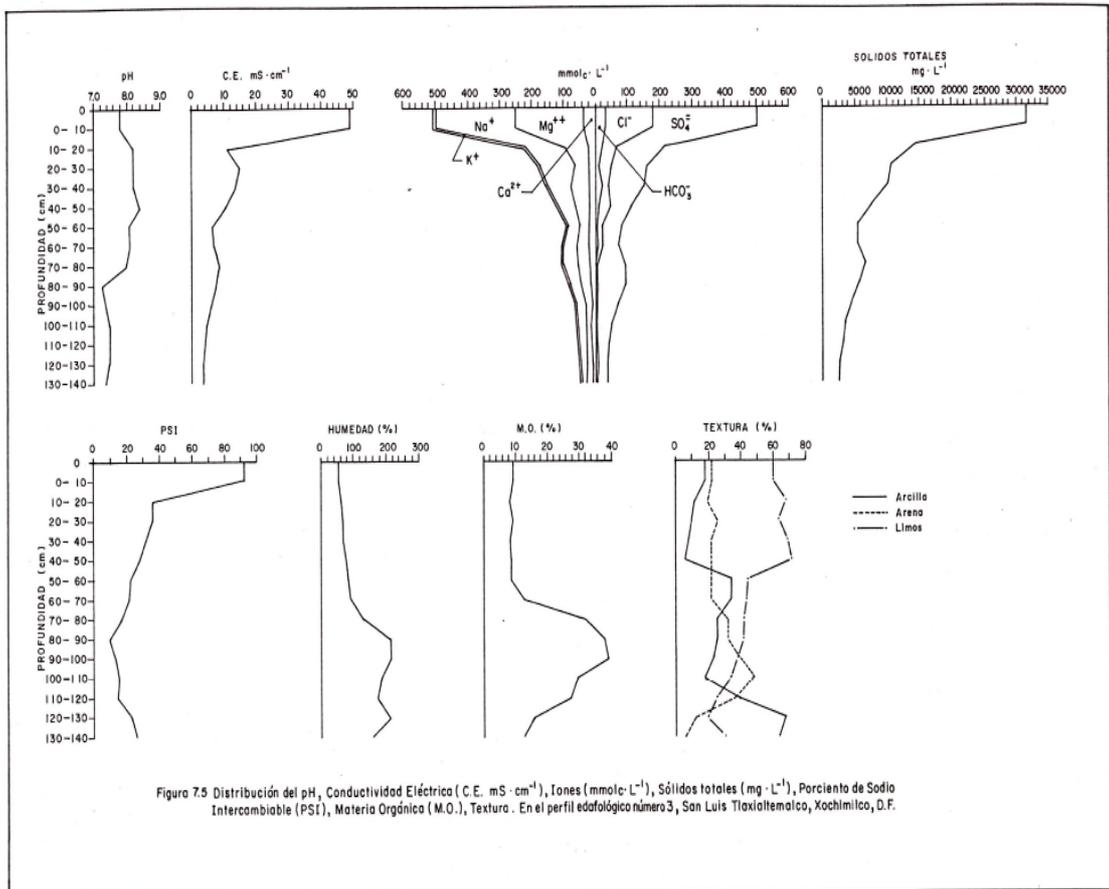


Figura 7.5 Distribución del pH, Conductividad Eléctrica (C.E. mS · cm⁻¹), Iones (mmolc · L⁻¹), Sólidos totales (mg · L⁻¹), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), Materia Orgánica (M.O.), Textura. En el perfil edafológico número 3, San Luis Tlaxiatlalco, Xochimilco, D.F.

Cuadro 7.6. Composición iónica del extracto de saturación del P-3 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Muestra	Profundidad	pH	C.E.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	SUMA	PSI
No.	cm		mS cm ⁻¹	mmol. L ⁻¹									mmol. L ⁻¹	mg L ⁻¹	
30	0-10	7.8	49.0	31.76	221.22	245.26	5.68	503.92	4.85	28.64	147.38	319.43	500.30		92.23
				636.47	2 687.82	5 640.98	222.09		145.50	1 747.04	5 224.62	15 342.22		31 647	
31	10-20	8.2	21.0	18.84	71.99	124.74	7.36	222.93	4.08	21.09	44.90	149.80	219.87		36.34
				377.55	874.68	2 869.02	287.78		122.40	1 286.49	1 591.71	7 194.89		14 604	
32	20-30	8.2	15.0	16.78	46.97	98.53	0.96	163.24	4.65	14.73	31.72	114.24	165.34		36.38
				336.27	570.69	2 266.19	37.54		139.50	898.53	1 124.47	5 486.95		10 860	
33	30-40	8.2	14.0	17.68	53.41	83.70	1.19	155.98	6.35	15.87	26.19	110.16	158.57		32.31
				354.30	648.93	1 925.10	46.53		190.50	968.07	928.44	5 290.98		10 353	
34	40-50	8.4	10.5	15.44	44.81	59.38	0.66	120.29	4.32	14.39	21.84	77.05	117.60		27.83
				309.42	544.44	1 365.74	25.81		129.60	877.79	774.23	3 700.71		7 728	
35	50-60	8.1	7.4	17.27	30.96	34.78	3.57	86.58	0.00	11.54	17.26	58.65	87.45		22.81
				346.09	376.16	799.94	139.59		0.00	703.94	611.87	2 816.96		5 795	
36	60-70	8.1	7.4	13.87	27.23	30.66	2.93	74.69	0.00	11.36	12.75	52.09	76.20		22.19
				277.95	330.84	705.18	114.56		0.00	692.96	451.99	2 501.88		5 075	
37	70-80	8.0	8.6	17.64	34.31	44.12	4.03	100.10	0.00	8.37	9.52	83.79	101.68		17.01
				353.51	416.87	1 014.76	157.57		0.00	510.57	337.48	4 024.43		6 815	
38	80-90	7.3	8.3	13.54	37.65	33.58	2.84	87.61	0.00	5.50	6.31	83.69	95.50		10.25
				271.34	457.45	772.34	111.04		0.00	335.50	223.69	4 019.63		6 191	
39	90-100	7.4	6.7	12.19	30.09	30.68	3.23	76.19	0.00	5.52	5.79	62.87	74.18		13.68
				244.29	365.59	705.64	126.29		0.00	336.72	205.26	3 019.65		5 003	
40	100-110	7.5	5.2	10.25	17.08	22.99	2.74	53.06	0.00	3.56	3.00	45.38	51.94		15.88
				205.41	207.52	528.77	107.13		0.00	217.16	106.35	2 179.60		3 552	
41	110-120	7.5	4.8	8.20	17.02	22.05	2.78	50.05	0.00	2.78	3.27	42.33	48.38		14.99
				164.32	206.79	507.15	108.70		0.00	169.58	115.92	2 033.11		3 306	
42	120-130	7.5	3.8	6.87	16.88	18.85	2.69	45.29	0.00	9.79	10.15	23.97	43.91		23.74
				137.67	205.09	433.55	105.18		0.00	597.19	359.82	1 151.28		2 990	
43	130-140	7.4	3.9	5.87	16.62	15.64	2.74	40.87	0.00	8.51	9.36	24.30	42.17		26.90
				117.63	201.93	359.72	107.13		0.00	519.11	331.81	1 167.13		2 804	

Por lo tanto en el P-5 hay una correlación negativa muy marcada con la profundidad y espacio poroso y partículas de arcilla.

La DR más alta también se presenta en el P-4 con valores que van de 2.08 a 2.16 Mg m⁻³ en los primeros 30 cm; y de 1.94 a 2.13 Mg m⁻³ en las capas más profundas.

En el P-5 oscila de 1.99 a 2.04 en los primeros 40 cm y de 2.03 a 2.11 Mg m⁻³ en las capas más profundas.

El porcentaje de espacio poroso es más alto en el P-5 con valores que van de 72.36 a 74.02 en los primeros 30 cm hasta 88.40 y 90.52 en las capas más profundas. El análisis de correlación mostró que hay una asociación positiva con la profundidad y con las partículas de arcilla y una asociación negativa con las partículas de arena, limo y MO. Ver Cuadro A5.

La clase textural en el P-3 y en el P-4 es migajón limoso, migajón arcilloso, franco y migajón arcillo limoso. Mientras que en el P-5 la textura es de arcilla y migajón arcilloso.

Las más altas correlaciones se obtuvieron en los P-4 y P-5. En el P-4, el análisis de correlación mostró que el % de arena tiene una asociación positiva con la profundidad.

El porcentaje de MO es más alto en el P-3 con valores que van de 8.04 a 8.87%, en los primeros 30 cm y de 28.47 a 39.36% en las capas de 70 a 120 cm de profundidad.

El análisis de correlación mostró que la MO tiene asociación positiva con la profundidad; CIC; y Mg²⁺ intercambiable. En este caso la CIC está representada por los coloides orgánicos. Hay una asociación negativa con el pH en H₂O 1:5 y 1:10, K⁺ intercambiable; pH del extracto del suelo; CO₃²⁻ y PSI; esto se debe a que la alta composición de los coloides orgánicos existe una predominancia de ácidos fúlvico > ácidos húmicos y a la ausencia de iones CO₃²⁻.

En el P-4 la MO oscila de 10.88 a 11.89% en los primeros 40 cm y de 5.69 a 6.53% en las capas intermedias y nuevamente tiende a elevarse hasta 14.39 % en las capas más profundas.

En el P-5 fluctúa de 9.44 a 10.57% en los primeros 40 cm y de 5.59 a 6.21% en las capas intermedias. El análisis de correlación mostró que la MO tiene asociación positiva con el pH en H₂O 1:5 y 1:10; CIC; Ca²⁺ y Mg²⁺ intercambiables; y pH del extracto de saturación.

El pH con H₂O en la relación 1:5 en el P-3 es de 8.5 y 8.6 moderadamente alcalino de 0 a 70 cm de profundidad, a 7.8 en las capas más profundas; por lo que el análisis de correlación mostró tener una asociación positiva con el K⁺ intercambiable y una correlación negativa con la profundidad y la MO.

En el P-4 el pH con H₂O en la relación 1:5 fue de 8.2 a 8.5 moderadamente alcalino en los primeros 50 cm y de 7.0 a 7.6 ligeramente alcalino en las capas más profundas; por lo que el análisis de correlación mostró que el pH tiene asociación positiva con los cationes intercambiables Ca²⁺; Mg²⁺; Na⁺ y K⁺; CE; PSI y una correlación negativa con la profundidad.

Cuadro 7.7. Propiedades físicas y químicas del P-4 San Luis Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Muestra	Profundidad	Color						Textura					pH				Cationes Intercambiables				
		Seco	Húmedo	H	D.A.	D.R.	Por.	Ar	Li	Arc	M.O.	C	H ₂ O		KCl		CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
No.	cm			%	Mg m ⁻³		%	%			%	1:5	1:10	1:5	1:10	cmol(+)/kg ⁻¹					
44	0-10	10YR 5/2 Pardo gris.	10YR 2/1 Negro	54.78	0.72	2.08	65.38	28.8	50.0	21.2	11.89	6.89	8.3	8.4	8.0	8.1	56.28	53.59	55.65	17.17	4.61
45	10-20	10YR 5/2 Pardo gris.	10YR 2/1 Negro	60.22	0.73	2.16	66.20	28.6	50.2	21.2	11.39	6.61	8.3	8.4	8.0	8.0	55.87	55.92	46.20	15.00	6.15
46	20-30	10YR 5/2 Pardo gris.	10YR 2/1 Negro	59.94	0.70	2.11	66.82	28.6	48.2	23.2	10.88	6.31	8.2	8.3	7.9	7.9	56.48	46.60	51.45	15.21	6.15
47	30-40	10YR 5/2 Pardo gris.	10YR 2/1 Negro	64.96	0.71	1.92	63.02	28.8	50.0	21.2	11.55	6.70	8.2	8.3	7.9	7.9	55.07	44.27	52.50	14.78	5.64
48	40-50	10YR 5/2 Pardo gris.	10YR 2/1 Negro	65.92	0.72	2.18	66.97	22.8	50.0	27.2	9.71	5.63	8.5	8.6	8.0	8.0	54.27	48.93	42.00	14.78	3.39
49	50-60	10YR 6/2 Gris pardo	10YR 3/1 Gris muy oscuro	73.57	0.63	2.32	72.84	18.8	56.0	25.2	6.53	3.79	8.4	8.5	7.9	7.8	54.87	38.44	40.95	14.78	2.05
50	60-70	10YR 6/3 Pardo Pálido	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	77.66	0.66	2.17	69.58	8.8	58.0	33.2	5.69	3.30	8.2	8.3	7.6	7.5	50.65	33.78	35.70	11.96	1.15
51	70-80	10YR 6/3 Pardo Pálido	10YR 3/2 Pardo gris. muy osc.	99.39	0.54	2.12	74.52	6.4	61.4	31.4	5.86	3.39	8.1	8.2	7.4	7.3	47.83	34.95	27.30	11.52	0.84
52	80-90	10YR 6/3 Pardo Pálido	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	151.08	0.43	1.91	77.48	14.8	49.6	35.6	8.54	4.95	7.9	8.0	7.1	7.0	42.81	31.45	24.15	11.52	0.81
53	90-100	10YR 7/1 Gris claro	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	157.48	0.39	2.10	81.42	18.6	59.8	21.6	9.04	5.24	7.8	7.9	7.0	6.9	36.58	31.45	26.25	11.52	0.69
54	100-110	10YR 7/1 Gris claro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	157.67	0.41	2.07	80.19	23.6	40.4	36.0	10.21	5.92	7.7	7.8	6.9	6.8	39.19	27.96	28.35	10.00	0.76
55	110-120	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	131.22	0.44	2.16	79.62	22.0	42.0	36.0	11.22	6.50	7.6	7.7	6.9	6.8	41.40	29.12	25.20	10.21	0.88
56	120-130	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	126.47	0.41	1.94	78.86	19.8	46.2	34.0	11.55	6.70	7.4	7.5	6.8	6.7	42.61	31.45	22.05	10.00	0.92
57	130-140	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	141.27	0.47	2.13	77.93	19.8	74.6	5.6	14.39	8.35	7.0	7.1	6.6	6.5	48.84	30.29	26.25	9.56	0.96

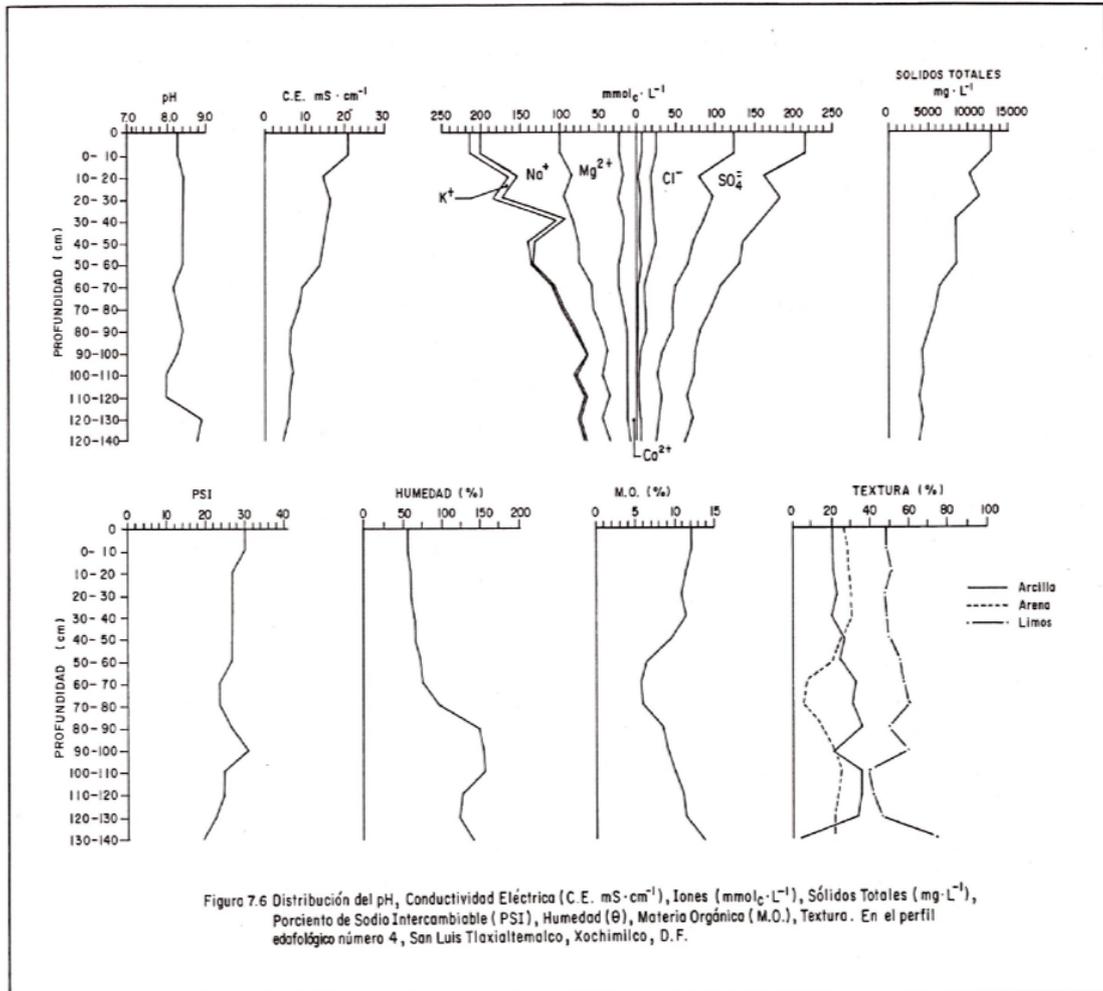


Figura 7.6 Distribución del pH, Conductividad Eléctrica (C.E. $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), Iones ($\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$), Sólidos Totales ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), Humedad (θ), Materia Orgánica (M.O.), Textura. En el perfil edafológico número 4, San Luis Tlaxiáltemalco, Xochimilco, D.F.

Cuadro 7.8. Composición iónica del extracto de saturación del P-4 San Luis Tlaxiátemalco, Xoch. D.F.

Muestra	Profundidad	pH	C.E.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	SUMA	PSI	
No.	Cm		mS cm ⁻¹	mmolc L ⁻¹										mmolc L ⁻¹	mg L ⁻¹	
44	0-10	8.3	21.0	21.7	76.79	100.81	15.52	214.82	5.71	19.29	99.57	91.19	215.76		30.50	
				434.87	933.00	2 318.63	606.83		171.30	1 176.69	3 529.76	4 379.86		12 944		
45	10-20	8.4	15.3	18.77	63.33	70.53	10.06	162.69	2.48	16.53	64.38	80.00	163.39		26.84	
				376.15	769.46	1 622.19	393.35		74.40	1 008.33	2 282.27	3 842.40		10 369		
46	20-30	8.4	16.7	21.37	72.95	77.43	10.58	182.33	5.61	16.82	75.87	85.68	183.98		26.93	
				428.25	886.34	1 780.89	413.68		168.30	1 026.02	2 689.59	4 115.21		11 508		
47	30-40	8.4	16.1	16.24	67.22	70.71	8.56	162.73	4.23	19.01	63.52	73.00	159.76		26.84	
				325.45	816.72	262,43	334.70		126.90	1 159.61	2 251.78	3 506.19		8 784		
48	40-50	8.4	13.2	17.36	57.26	59.09	4.97	138.68	4.41	20.59	47.03	63.63	135.66		27.23	
				347.89	695.71	1 359.07	194.33		132.3	1 255.99	1 667.21	3 056.15		8 709		
49	50-60	8.4	12.0	21.7	52.59	57.32	2.10	133.71	6.56	10.66	48.39	65.31	130.92		26.93	
				434.87	638.97	1 318.36	82.11		196.80	650.26	1 715.43	3 136.84		8 174		
50	60-70	8.2	9.2	21.54	38.36	44.30	0.64	104.84	2.80	9.10	38.42	56.92	107.24		23.55	
				431.66	466.07	1 018.90	25.02		84.0	555.10	1 361.99	2 733.87		6 677		
51	70-80	8.3	8.1	16.55	39.41	38.33	0.62	94.91	1.57	10.24	35.51	49.92	97.24		24.08	
				331.66	478.83	881.59	24.24		47.1	624.64	1 258.83	2 397.66		6 045		
52	80-90	8.4	6.7	12.70	31.67	35.36	0.64	80.37	3.03	11.36	32.92	35.70	83.01		26.90	
				254.51	384.80	813.28	25.02		90.9	692.96	1 167.01	1 714.67		5 144		
53	90-100	8.3	6.4	12.31	31.62	29.21	0.74	73.88	0.00	7.19	27.14	41.30	75.63		31.49	
				246.69	384.18	671.83	28.93		0.00	438.59	962.11	1 983.64		4 716		
54	100-110	8.0	7.3	10.57	31.83	32.76	0.87	76.03	0.00	4.55	22.83	46.24	73.62		25.51	
				211.82	386.73	753.48	34.02		0.00	277.55	809.32	2 220.91		4 694		
55	110-120	8.0	6.2	11.59	24.04	29.79	0.88	66.30	0.00	4.10	29.44	31.64	65.18		24.66	
				332.26	292.09	685.17	34.41		0.00	250.10	1 043.65	1 519.67		4 157		
56	120-130	7.9	6.0	11.74	29.11	29.41	1.00	71.26	0.00	5.96	23.89	43.12	72.97		23.47	
				235.27	353.69	676.43	39.1		0.00	363.56	846.90	2 071.05		4 586		
57	130-140	7.8	5.5	9.79	22.20	29.43	1.02	62.44	0.00	6.54	20.37	36.96	63.87		19.57	
				196.19	269.73	676.89	39.88		0.00	398.94	722.12	1 775.19		4 079		

En el P-5 el pH con H₂O 1:5 fluctúa de 8.3 a 8.6 moderadamente alcalino en los primeros 50 cm y de 5.9 a 6.2 ligeramente ácido en las capas más profundas, indicando una asociación positiva con los cationes intercambiables Ca²⁺; Mg²⁺; Na⁺ y K⁺; CE y PSI y una asociación negativa con la profundidad.

Estas asociaciones positivas en los perfiles P-3, P-4 y P-5 que se tienen con el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , CE y PSI se deben a la presencia de sales alcalinas. En estas condiciones las cargas de los coloides orgánicos e inorgánicos aumentan propiciándose con esto un alto valor del parámetro del PSI.

La CIC en el P-3 fluctúa de 52.72 a 70.7 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 30 cm; y de 38.77 a 48.51 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en las capas más profundas, por lo que el análisis de correlación mostró tener una asociación positiva con las partículas de arcilla y MO.

En el P-4 la CIC osciló de 55.07 a 56.48 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en las capas superficiales y de 41.40 a 48.84 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en las capas más profundas, con una correlación positiva con Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+ , K^+ y CE. Mostró una correlación negativa con la profundidad.

En el P-5 la CIC fluctuó de 45.65 a 46.46 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 30 cm y de 16.36 a 18.98 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en las capas más profundas. El análisis de correlación mostró tener una asociación positiva con la MO, Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+ y K^+ intercambiables y PSI; una correlación negativa con la profundidad y las partículas de arcilla. Estas asociaciones positivas que se tienen en los perfiles P-3, P-4 y P-5 se deben al aumento considerable que se tiene de MO en el P-5 y de arcilla en el P-3; por lo tanto al incrementarse la MO y arcilla aumentan los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ intercambiables y como consecuencia se presenta un aumento considerable del PSI. La correlación positiva que se tiene con la CE se debe al aumento de sales solubles en las capas superficiales.

Los iones de Ca^{2+} intercambiables en el P-3 son más altos que en los perfiles P-4 y P-5; ya que los valores fluctúan de 76.26 a 84.87 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 40 cm y de 28.29 a 34.44 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en las capas más profundas; mostrando una asociación positiva con Mg^{2+} intercambiable y CE; esto se debe al aumento de la concentración de sales solubles en la superficie. El alto contenido de Mg intercambiable se debe a las altas concentraciones de MgSO_4 en las soluciones salinas. Existe una asociación negativa con la profundidad. Los contenidos de iones Ca^{2+} obtenidos se deben probablemente a la acumulación de CaCO_3 que se formó durante el intemperismo de los minerales que contienen Ca^{2+} como $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$ que al combinarse con el H_2O y CO_2 liberan altos contenidos de CaCO_3 y de MgCO_3 (Dixon y Weed, 1989).

Los iones de Mg^{2+} intercambiables son más altos en el P-4 con valores que fluctúan de 46.20 a 55.65 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 40 cm de profundidad y de 22.05 a 26.25 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en las capas más profundas. Por lo tanto el análisis de correlación mostró que el Mg^{2+} tiene una asociación positiva con el pH en H_2O 1:5 y 1:10; pH en KCl 1:5 y 1:10; Na^+ y K^+ intercambiables; pH del extracto de saturación y CE.

Los iones Na^+ intercambiables en el P-3 fueron más altos con respecto a los P-4 y P-5, con valores que fluctúan de 15.86 a 65.21 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 40 cm de profundidad y de 10.43 a 11.52 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en las capas más profundas. Existiendo una correlación positiva con K^+ intercambiable; CE y PSI.

Los iones K^+ intercambiables más altos fueron en el P-4 con respecto al P-3 y P-5 con valores de 3.39 a 6.15 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 50 cm y de 0.88 a 0.96 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en las capas más profundas.

El análisis de correlación mostró que los iones K^+ tienen una asociación positiva con el pH en H_2O 1:5 y 1:10; pH en KCl 1:5 y 1:10 y pH del extracto de saturación CE.

Todas estas asociaciones positivas se deben a la presencia de sales alcalinas como $CaHCO_3$, Na_2CO_3 y $NaSiO_3$

La CE más alta se encuentra en el P-3 con valores de 14.0 a 49.0 $mS\ cm^{-1}$ en los primeros 40 cm de profundidad, y de 3.8 a 4.8 $mS\ cm^{-1}$ en las capas más profundas, mostrando una correlación positiva con el pH en KCl 1:5 y 1:10 y PSI.

Con respecto a los contenidos de Na^+ soluble éstos oscilan de 3.63 a 133.90 $mmol_c\ L^{-1}$ en el P-5 hasta valores de 245.26 $mmol_c\ L^{-1}$ en el P-3. También los cationes solubles Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , tuvieron las más altas concentraciones con valores de 221.22, 31.76 y 319.43 $mmol_c\ L^{-1}$ respectivamente en el P-3; así como los Cl^- y HCO_3^- con valores de 147.38 y 28.64 $mmol_c\ L^{-1}$ respectivamente en el mismo perfil.

Los iones K^+ y CO_3^{2-} presentaron los más altos contenidos en el P-4 con valores 15.52 y 6.56 $mmol_c\ L^{-1}$ respectivamente.

Los valores del PSI más altos obtenidos se encontraron en el P-3 y P-5. En el P-3 fluctuaron de 27.83 a 92.23 en los primeros 50 cm de profundidad, y de 14.99 a 26.90 en las capas más profundas, mostrando una correlación positiva con el pH en KCl 1:5 y 1:10; Na^+ y K^+ intercambiables y CE.

En el P-5, los valores de PSI fluctuaron de 15.36 a 72.90 en los primeros 40 cm de profundidad, y de 10.43 a 12.44 en las capas más profundas, mostrando una correlación positiva con el pH en H_2O 1:5 y 1:10.

Estas correlaciones positivas que se presentan en los P-3, P-4 y P-5; con el pH en H_2O 1:5 y 1:10; así como de las bases intercambiables se deben a la presencia de sales sódicas como $NaHCO_3$ y sales neutras como $NaCl$, K_2SO_4 y $MgSO_4$ y en menor concentración $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$, $MgCl_2$ y $CaCl_2$, acumulándose principalmente en las capas superficiales.

Con todo lo anterior, el P-3, se caracteriza por ser un suelo salino-sódico de 0 a 80 y de 100 a 110 cm; salino de 80 a 100 y de 110 a 120 cm; y sódico de 120 a 140 cm de profundidad, de acuerdo al Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Richards, 1985).

El P-4 es un suelo salino-sódico de 0 a 140 cm de profundidad.

El P-5 se caracteriza por ser un suelo salino sódico de 0 a 30 cm; sódico de 30 a 40 cm; 60 a 80 y de 140 a 150 cm de profundidad; normal de 40 a 60 cm; de 80 a 140 y de 150 a 180 cm de profundidad.

Cuadro 7.9. Propiedades físicas y químicas del P-5 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Color						Textura					pH				Cationes Intercambiables				
		Seco	Húmedo	H	D.A.	D.R.	Por.	Ar	Li	Arc	M.O.	C	H ₂ O		KCl		CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
				%	Mg m ⁻³		%	%			%		1:5	1:10	1:5	1:10	cmol(+)/kg ⁻¹				
58	0-10	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	58.11	0.55	1.99	72.36	18.4	39.8	41.8	9.44	5.47	8.3	8.4	7.7	7.7	46.25	50.40	39.59	33.72	0.38
59	10-20	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	82.82	0.55	2.04	73.03	22.4	41.8	35.8	9.76	5.66	8.4	8.6	7.8	7.7	45.65	45.92	29.96	18.05	0.38
60	20-30	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	87.42	0.53	2.04	74.02	24.2	39.8	35.8	10.57	6.13	8.6	8.8	7.8	7.8	46.46	38.08	23.54	13.05	0.40
61	30-40	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	96.51	0.51	2.04	75.00	22.4	35.8	41.8	10.56	6.12	8.6	8.8	7.7	7.7	45.45	36.96	18.19	6.98	0.34
62	40-50	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	112.76	0.51	2.05	75.12	24.4	41.8	33.8	13.83	8.02	7.8	8.0	7.2	7.1	43.83	34.72	22.47	5.83	0.19
63	50-60	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	133.43	0.36	2.04	82.35	24.4	33.8	41.8	10.72	6.22	7.1	7.3	6.5	6.5	36.76	23.52	17.12	3.63	0.11
64	60-70	10YR 8/1 Blanco	10YR 2/1 Negro	194.27	0.24	2.13	88.73	16.4	25.8	57.8	5.59	3.24	6.8	7.0	6.2	6.2	16.76	10.08	9.63	2.67	0.13
65	70-80	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/2 Pardo gris. muy osc.	206.22	0.23	1.95	88.20	16.4	29.8	53.8	5.74	3.32	6.6	6.7	5.9	6.0	14.34	7.84	9.63	2.58	0.19
66	80-90	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/2 Pardo gris. muy osc.	238.14	0.21	2.08	89.90	16.4	25.8	57.8	6.21	3.60	6.2	6.5	5.8	5.8	16.44	7.84	10.7	2.17	0.23
67	90-100	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/2 Pardo gris. muy osc.	267.67	0.20	2.05	90.24	14.4	25.8	59.8	6.52	3.78	6.2	6.3	5.7	5.7	19.48	8.96	7.49	2.24	0.23
68	100-110	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/3 Pardo osc.	271.00	0.21	2.09	89.95	16.4	25.8	57.8	7.15	4.14	6.0	6.3	5.7	5.7	19.48	8.96	7.49	2.32	0.21
69	110-120	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/3 Pardo osc.	275.14	0.23	2.04	88.72	14.4	17.8	67.8	8.08	4.69	6.1	6.4	5.8	5.8	20.09	12.32	5.35	2.37	0.23
70	120-130	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/3 Pardo osc.	273.19	0.2	2.02	90.10	14.4	15.8	69.8	8.54	4.95	6.2	6.4	5.8	5.8	20.30	8.96	9.63	1.91	0.23
71	130-140	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/3 Pardo osc.	266.88	0.19	2.10	90.95	22.4	7.8	69.8	7.15	4.14	6.3	6.5	5.8	5.8	19.99	8.96	7.49	2.11	0.23
72	140-150	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/2 Pardo gris. muy osc.	236.40	0.27	1.96	86.22	16.4	9.8	73.8	7.92	4.59	6.2	6.4	5.7	5.7	10.38	11.20	7.49	2.04	0.33
73	150-160	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/2 Pardo gris. muy osc.	250.05	0.27	2.03	86.69	16.4	9.8	73.8	10.1	5.85	6.1	6.3	5.7	5.6	16.96	10.08	8.56	2.11	0.26
74	160-170	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/3 Pardo osc.	260.39	0.24	2.07	88.40	12.4	13.8	73.8	8.7	5.04	6.1	6.3	5.7	5.6	16.36	8.96	7.49	1.98	0.26
75	170-180	10YR 8/1 Blanco	10YR 3/3 Pardo osc.	277.34	0.20	2.11	90.52	14.4	9.8	75.8	7.92	4.59	5.9	6.2	5.5	5.4	18.98	7.84	10.7	1.98	0.23

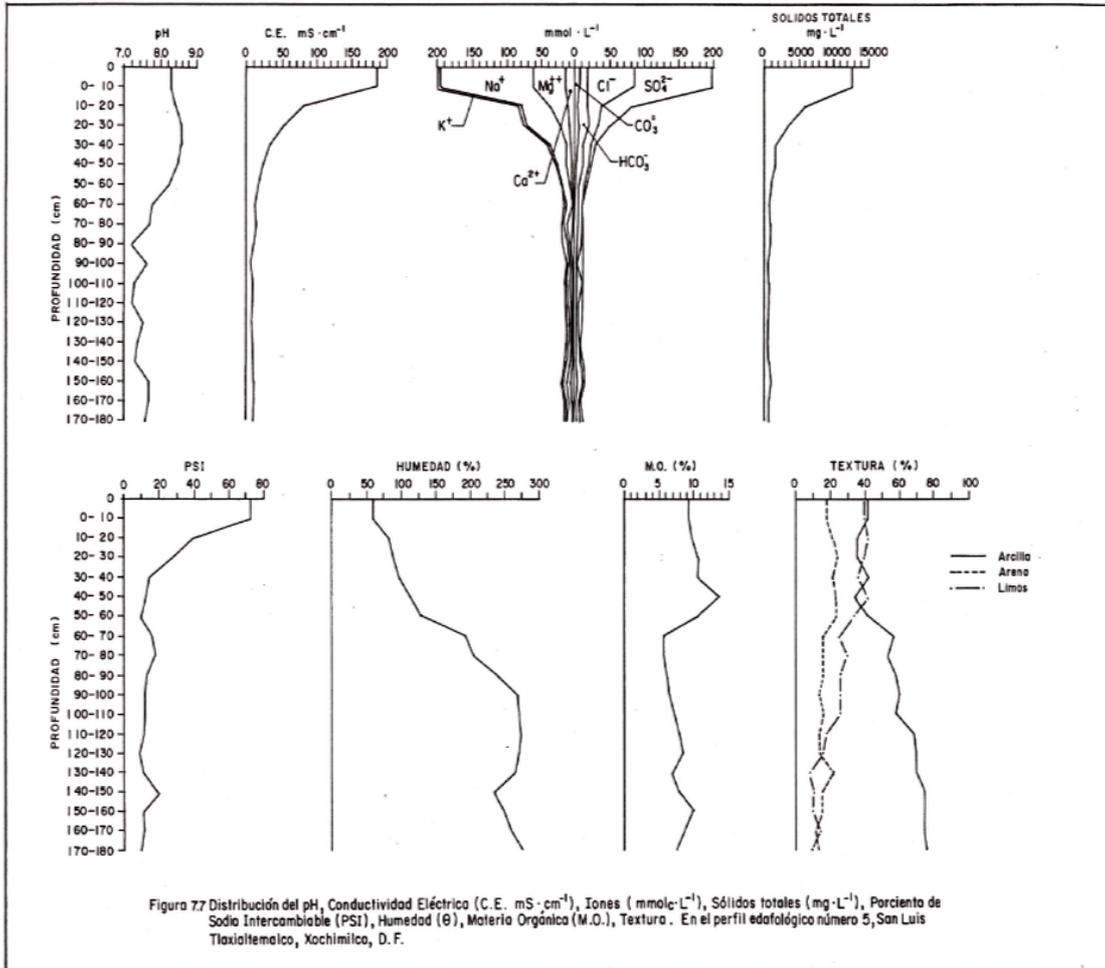


Figura 7.7 Distribución del pH, Conductividad Eléctrica (C.E. $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), Iones ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), Sólidos totales ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), Humedad (θ), Materia Orgánica (M.O.), Textura. En el perfil edafológico número 5, San Luis Tlaxiotepec, Xochimilco, D. F.

Cuadro 7.10. Composición iónica del extracto de saturación del P-5 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Muestra No.	Profundidad Cm	pH	C.E. mS cm ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	SUMA	PSI
				mmolc L ⁻¹								mmolc L ⁻¹	mg L ⁻¹		
58	0-10	8.3	18.9	14.89	47.62	133.90	0.37	196.78	5.93	12.59	67.42	112.33	198.27	72.90	
				298.40	578.58	3 079.7	14.47		177.90	767.99	2 390.04	5 395.21	12 702		
59	10-20	8.4	8.2	12.82	22.67	47.45	0.22	83.16	3.57	13.09	19.04	49.47	85.17	39.54	
				256.91	275.44	1 091.35	8.60		107.10	798.49	674.97	2 376.04	5 589		
60	20-30	8.6	5.2	9.23	13.00	32.55	0.20	54.98	5.30	12.58	15.75	19.85	53.48	28.09	
				184.97	157.95	748.65	7.82		159.0	767.38	558.34	953.40	3 538		
61	30-40	8.6	3.3	5.87	7.09	20.57	0.15	33.68	5.15	8.25	10.57	8.39	32.36	15.36	
				117.63	86.14	473.11	5.87		154.50	503.25	374.71	402.97	2 118		
62	40-50	8.5	2.4	5.18	6.58	13.79	0.11	25.66	3.59	7.19	10.31	3.59	24.68	13.30	
				103.81	79.95	317.17	4.30		107.70	438.59	365.49	172.43	1 589		
63	50-60	8.3	1.7	4.25	4.70	8.51	0.06	17.52	0.93	5.55	7.97	3.57	18.02	9.87	
				85.17	57.11	195.73	2.35		27.90	338.55	282.54	171.47	1 161		
64	60-70	7.8	1.2	3.62	3.85	5.50	0.08	13.05	0.00	4.62	6.55	2.16	13.33	15.93	
				72.54	46.78	126.50	3.13.		0.00	281.82	232.20	103.74	867		
65	70-80	7.7	1.4	4.18	5.16	5.80	0.12	15.26	0.00	4.41	6.63	3.46	14.50	17.99	
				83.77	62.69	133.40	4.69		0.00	269.01	235.03	166.18	955		
66	80-90	7.2	1.2	3.95	4.13	5.26	0.05	13.39	0.00	4.05	6.31	3.47	13.83	13.19	
				79.16	50.18	120.98	1.96		0.00	247.05	223.69	166.66	890		
67	90-100	7.6	0.8	2.89	2.80	3.62	0.05	9.36	0.00	2.59	4.01	2.95	9.55	11.50	
				57.92	34.02	83.26	1.96		0.00	158.00	142.15	141.69	619		
68	100-110	7.3	1.0	2.64	3.29	5.29	0.14	11.36	0.00	3.81	6.25	1.09	11.15	11.91	
				52.91	39.97	121.67	5.47		0.00	232.41	221.56	52.35	726		
69	110-120	7.2	0.9	2.82	3.50	4.18	0.16	10.66	0.00	2.69	5.14	3.32	11.15	11.80	
				56.51	42.53	96.14	6.26		0.00	164.09	182.21	159.46	707		
70	120-130	7.5	0.8	3.52	1.89	3.72	0.17	9.30	0.00	3.17	3.07	3.32	9.56	9.41	
				70.54	22.96	85.56	6.65		0.00	193.37	108.83	159.46	647		
71	130-140	7.4	0.9	3.18	2.73	3.86	0.18	9.95	0.00	3.23	5.29	0.55	9.07	10.55	
				63.73	33.17	88.78	7.04		0.00	197.03	187.53	26.42	604		
72	140-150	7.3	1.0	3.52	3.03	4.39	0.20	11.14	0.00	4.29	5.28	1.10	10.67	19.65	
				70.54	36.81	100.97	7.82		0.00	261.69	187.18	52.83	718		
73	150-160	7.7	1.3	4.67	4.94	5.63	0.24	15.48	0.00	5.53	6.59	3.87	15.99	12.44	
				93.59	60.02	129.49	9.38		0.00	337.33	233.62	185.87	1 049		
74	160-170	7.7	1.1	3.4	4.38	4.23	0.37	12.38	0.00	3.30	4.21	4.71	12.22	12.10	
				68.14	53.22	97.29	14.47		0.00	201.3	149.24	226.22	810		
75	170-180	7.6	1.1	4.47	3.90	4.66	0.20	13.23	0.00	4.02	5.36	4.52	13.90	10.43	
				89.58	47.39	107.18	7.82		0.00	245.22	190.01	217.10	904		

7.1.3. Tláhuac

Los resultados de las propiedades físicas y químicas de los perfiles P-6, P-7 y P-8 se muestran en los Cuadros 7.11., 7.13. y 7.15.

Los resultados de cationes y aniones solubles de los perfiles P-6, P-7 y P-8 se muestran en los Cuadros 7.12., 7.14. y 7.16.

La distribución gráfica de los 3 perfiles se muestra en las Figuras 7.6, 7.7 y 7.8.

La matriz de correlaciones de Pearson de las propiedades físicas y químicas de los 3 perfiles se muestran en el Apéndice A, Cuadros A6, A7 y A8.

Los resultados de las concentraciones de los tipos de sales de los perfiles P-6, P-7 y P-8 se muestran en el Apéndice B, Cuadros B6, B7 y B8.

La distribución gráfica de los tipos de sales de los 3 perfiles se muestran en la Figura 7.18.

El color del suelo en los perfiles P-6, P-7 y P-8 va de gris 10YR 5/1; gris muy oscuro 10YR 3/1; pardo grisáceo muy oscuro 10YR 3/2; gris claro 10YR 6/1; en seco y en húmedo negro 7.5 YR 2/0 y 10YR 2/1; y finalmente gris muy oscuro 10YR 3/1.

Se puede observar que hubo un mayor contenido de humedad en el P-6 con porcentajes que fluctúan de 68.29 a 98.50% en los primeros 50 cm y de 342.65 a 377.48 % en las capas más profundas (90 a 100 cm), originada por el alto nivel freático a esta profundidad. El análisis de correlación mostró que el % de humedad tiene una asociación positiva muy elevada con la profundidad y con la materia orgánica. Esto se debe a la presencia de minerales amorfos.

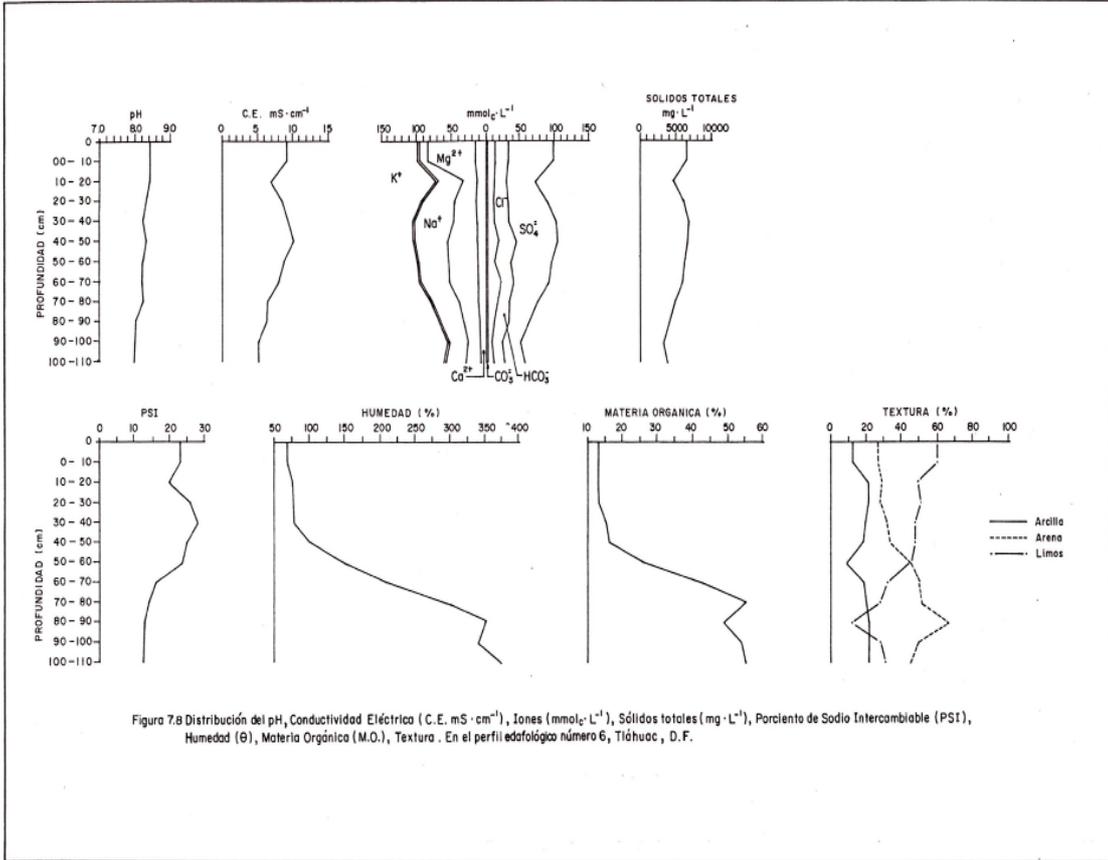
Le sigue el P-8 con valores de 75.39 a 110.36%, en los primeros 50 cm de profundidad, hasta valores que fluctúan de 129.54 a 166.37% en las capas más profundas (120 a 150 cm), mostrando una correlación positiva con la profundidad, % de porosidad y % arcilla; esto se debe a la presencia de amorfos.

La DA fue mayor en el P-6 con valores que oscilan de 0.65 a 0.69 Mg m⁻³ en los primeros 50 cm a 0.48 y 0.58 Mg m⁻³ en las capas más profundas (90 a 110 cm), mostrando correlaciones negativas con la profundidad y MO. Le sigue el P-8 con valores que oscilan de 0.54 a 0.60 Mg m⁻³, en los primeros 40 cm de profundidad y de 0.31 a 0.32 en las capas más profundas (130 a 150 cm).

Los valores más bajos se presentaron en el P-7, con valores que oscilan de 0.42 a 0.52 Mg m⁻³ en las capas más profundas (80 a 100 cm); mostrando una correlación negativa con la porosidad y la MO; esto se explica por la presencia de sustancias húmicas principalmente en las capas más profundas.

Cuadro 7.11. Propiedades físicas y químicas del P-6 Tláhuac, D.F.

Muestra	Profundidad	Color						Textura					PH				Cationes Intercambiables				
		Seco	Húmedo	H	D.A.	D.R.	Por.	Ar	Li	Arc	M.O.	C	H ₂ O		KCl		CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
No.	cm			%	Mg m ⁻³		%	%			%	1:5	1:10	1:5	1:10	cmol(+)kg ⁻¹					
76	0-10	10YR 5/1 Gris	7.5YR 2/0 Negro	68.29	0.66	2.06	58.25	27.4	60.4	12.2	12.58	7.29	8.4	8.4	7.9	8.0	54.67	69.44	31.56	12.61	0.89
77	10-20	10YR 5/1 Gris	7.5YR 2/0 Negro	75.46	0.68	2.13	57.27	29.4	48.6	22.0	12.74	7.39	8.5	8.6	7.8	8.0	55.67	64.96	35.84	11.30	1.05
78	20-30	10YR 5/1 Gris	7.5YR 2/0 Negro	74.59	0.69	2.06	58.25	27.5	50.4	22.0	13.20	7.66	8.5	8.7	7.9	8.0	55.07	70.56	37.98	14.35	0.58
79	30-40	10YR 5/1 Gris	7.5YR 2/0 Negro	77.98	0.65	2.08	55.28	31.6	48.4	20.0	14.60	8.47	8.4	8.5	7.8	7.9	56.48	54.88	37.98	15.65	0.42
80	40-50	10YR 3/1 Gris muy oscuro	7.5YR 2/0 Negro	98.50	0.60	2.10	41.90	33.6	48.4	18.0	16.31	9.46	8.4	8.5	7.9	7.9	63.31	49.28	44.94	15.65	0.33
81	50-60	10YR 3/1 Gris muy Oscuro	7.5YR 2/0 Negro	152.53	0.55	1.98	63.63	45.6	46.4	8.0	25.95	15.05	8.4	8.5	7.9	7.8	66.73	52.64	21.40	16.09	0.46
82	60-70	10YR 3/2 Pardo gris. muy oscuro	7.5YR 2/0 Negro	210.32	0.50	1.75	68.00	49.6	32.4	18.0	42.89	24.88	8.4	8.4	8.0	7.9	96.48	62.72	64.20	15.65	0.53
83	70-80	10YR 3/1 Gris muy oscuro	7.5YR 2/0 Negro	304.86	0.56	1.70	54.71	51.6	28.4	20.0	55.32	32.08	8.2	8.2	7.7	7.7	124.62	67.20	92.55	17.17	0.57
84	80-90	10YR 3/1 Gris muy oscuro	7.5YR 2/0 Negro	352.96	0.65	1.60	41.87	65.6	12.4	22.0	49.42	28.67	7.8	7.8	7.3	7.3	134.67	58.24	94.69	18.04	0.89
85	90-100	10YR 3/1 Gris muy oscuro	7.5YR 2/0 Negro	342.65	0.48	1.70	53.52	49.6	28.4	22.0	54.39	31.54	7.8	7.8	7.2	7.2	116.17	52.64	89.34	15.00	0.53
86	100-110	10YR 3/2 Pardo gris. muy oscuro	7.5YR 2/0 Negro	377.48	0.58	1.70	60.58	45.6	32.4	22.0	54.86	31.82	7.7	7.7	7.1	7.1	108.13	47.04	75.97	13.91	0.58



Cuadro 7.12. Composición iónica del extracto de saturación del P-6 Tláhuac, D.F.

Muestra	Profundidad	pH	C.E.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	SUMA	PSI
No.	cm		mS cm ⁻¹	mmolc L ⁻¹								mmolc L ⁻¹	mg L ⁻¹		
76	0-10	8.4	9.1	16.96	36.56	42.48	0.49	96.49	1.31	11.76	20.90	65.52	99.49		23.07
				339.88	444.20	977.04	19.16		39.3	717.36	740.91	3 146.93		6 425	
77	10-20	8.4	6.9	12.36	21.40	35.51	0.37	69.64	1.35	10.81	18.84	40.52	71.52		20.29
				247.69	260.01	816.73	14.47		40.5	659.4	667.88	1 946.18		4 653	
78	20-30	8.3	8.4	14.77	30.61	46.22	0.23	91.83	1.46	10.22	20.95	56.28	88.91		26.06
				295.99	371.91	1 063.06	8.99		43.8	623.42	742.68	2 703.13		5 853	
79	30-40	8.2	9.4	14.47	31.74	59.18	0.17	105.56	1.28	10.90	21.55	69.21	102.94		27.70
				289.98	385.64	1 361.14	6.65		38.4	664.9	763.95	3 324.16		6 835	
80	40-50	8.3	10.1	13.89	41.09	48.96	0.15	104.09	2.74	16.44	25.84	61.03	106.05		24.71
				278.36	499.24	1 126.08	5.87		82.20	1 002.84	916.03	2 931.27		6 842	
81	50-60	8.2	8.8	13.17	38.37	43.50	0.12	95.16	1.35	12.84	23.27	60.20	97.66		24.11
				263.93	466.20	1 000.5	4.69		40.5	783.24	824.92	2 891.41		6 275	
82	60-70	8.2	8.0	12.00	39.46	42.26	0.14	93.86	4.03	18.79	20.43	48.30	91.55		16.11
				240.48	479.44	971.98	5.47		120.9	1 146.19	724.24	2 319.85		6 009	
83	70-80	8.2	6.4	11.42	27.35	36.95	0.30	76.02	2.56	14.74	18.92	38.44	74.66		13.78
				228.86	332.30	849.85	11.73		76.8	899.14	670.71	1 846.27		4 916	
84	80-90	8.0	6.2	9.48	23.52	31.11	0.28	64.39	2.56	10.90	21.03	30.76	65.25		13.39
				189.98	285.77	715.53	10.95		76.8	664.90	745.51	1 477.40		4 167	
85	90-100	7.9	5.0	8.28	17.74	24.61	0.27	50.90	1.16	8.72	15.73	26.40	52.01		12.91
				165.93	215.54	566.03	10.56		34.8	531.92	557.63	1 267.99		3 350	
86	100-110	7.9	5.0	7.23	21.71	27.73	0.33	57.00	1.23	11.73	16.70	28.03	57.69		12.86
				144.89	263.78	637.79	12.90		36.9	715.53	592.01	1 346.28		3 750	

Cuadro 7.13. Propiedades físicas y químicas del P-7 Tláhuac, D.F.

Muestra	Profundidad	Color						Textura			pH				Cationes Intercambiables						
		Seco	Húmedo	H	D.A.	D.R.	Por.	Ar	Li	Arc	M.O.	C	H ₂ O		KCl		CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
No.	cm			%	Mg m ⁻³	%	%			%		1:5	1:10	1:5	1:10	cmol(+)/kg ⁻¹					
87	0-10	10YR 6/1 Gris claro	10YR 2/1 Negro	73.34	0.50	2.19	76.98	22.4	59.1	18.5	11.33	6.57	8.8	8.9	8.4	8.5	97.16	57.57	79.58	91.90	1.31
88	10-20	10YR 6/1 Gris claro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	114.96	0.49	2.13	76.89	20.7	33.4	45.8	10.28	5.96	8.9	9.0	8.3	8.4	41.67	23.04	38.74	29.25	0.94
89	20-30	10YR 7/1 Gris claro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	131.22	0.42	2.42	79.3	19.7	33.5	46.8	12.89	7.48	8.8	8.9	8.3	8.4	36.81	18.32	31.1	24.49	0.76
90	30-40	10YR 6/1 Gris claro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	137.86	0.52	2.17	05.65	23.7	54.5	21.8	11.15	6.47	8.5	8.6	8.0	8.1	47.19	48.69	26.91	15.06	0.89
91	40-50	10YR 6/1 Gris claro	10YR 2/1 Negro	82.17	0.58	2.28	74.54	29.7	30.0	40.3	8.71	5.05	8.5	8.6	7.9	8.0	42.20	40.84	21.99	10.81	0.71
92	50-60	10YR 6/1 Gris claro	10YR 2/1 Negro	87.58	0.55	2.25	75.44	32.4	22.6	45.1	8.54	4.95	8.7	8.8	7.7	7.8	38.95	23.04	21.99	10.41	0.67
93	60-70	10YR 7/1 Gris claro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	96.57	0.51	2.16	76.13	34.3	16.0	49.8	8.37	4.85	8.7	8.8	7.7	7.8	36.85	16.75	21.99	10.00	0.46
94	70-80	10YR 7/1 Gris claro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	127.61	0.47	2.11	77.54	40.5	12.9	46.6	10.42	6.04	8.3	8.4	7.2	7.3	40.05	18.43	23.46	8.43	0.63
95	80-90	10YR 7/1 Gris claro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	137.06	0.48	2.12	77.26	29.9	19.8	50.3	10.25	5.94	8.4	8.5	7.2	7.3	35.21	14.76	22,30	5.85	0.59
96	90-100	10YR 7/1 Gris claro	10YR 3/1 Gris muy oscuro	132.56	0.44	2.11	78.74	43.6	8.5	47.9	9.56	5.54	8.2	8.3	7.1	7.2	33.01	12.15	27.85	7.67	0.71

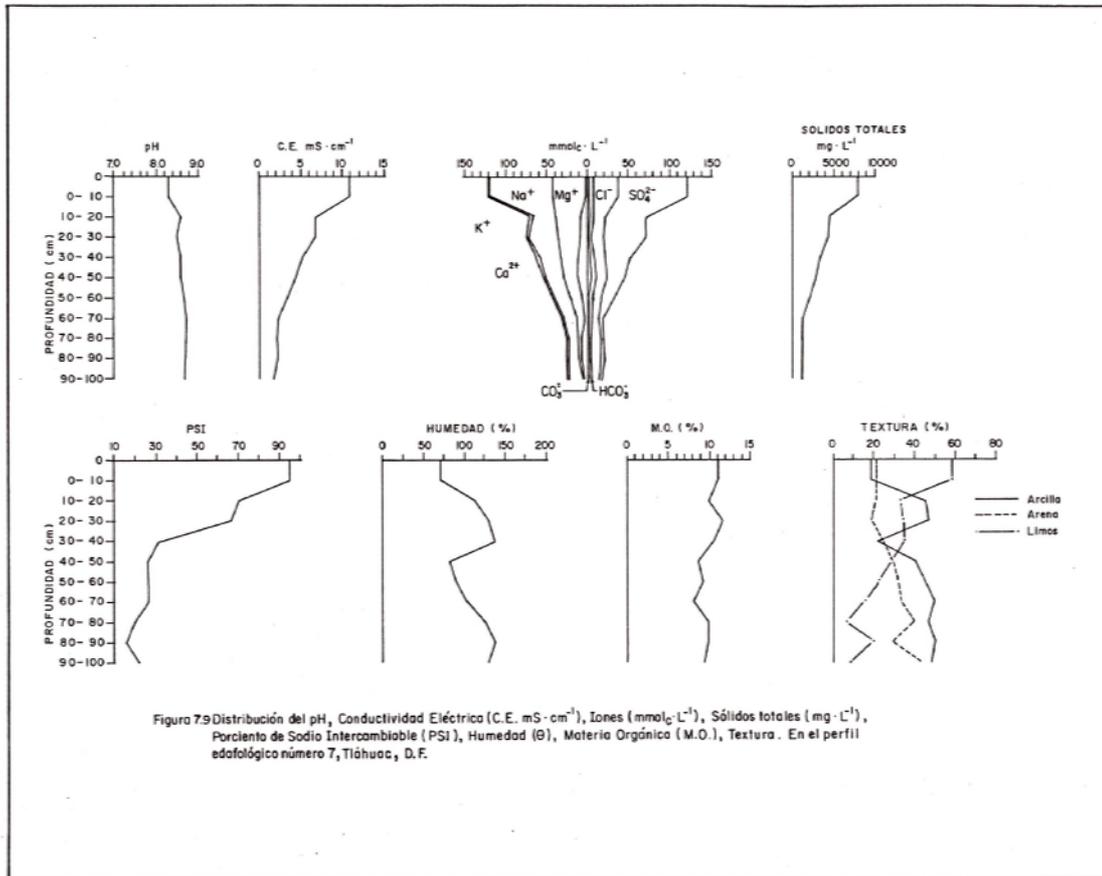


Figura 7.9 Distribución del pH, Conductividad Eléctrica (C.E. mS·cm⁻¹), Iones (mmol·L⁻¹), Sólidos totales (mg·L⁻¹), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), Humedad (H), Materia Orgánica (M.O.), Textura. En el perfil edafológico número 7, Tlahuac, D.F.

Cuadro 7.14. Composición iónica del extracto de saturación del P-7 Tláhuac, D.F.

Muestra	Profundidad	pH	C.E.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	1	PSI
No.	cm		mS cm ⁻¹	mmol _e L ⁻¹								mmol _e L ⁻¹	mg L ⁻¹		
87	0-10	8.3	11.0	0.64	40.99	76.78	0.38	118.79	1.05	5.75	30.66	83.81	121.27		94.59
				12.83	498.03	1 765.94	14.86		31.50	350.75	1 086.90	4 025.39		7 786	
88	10-20	8.6	6.9	7.59	32.46	29.33	0.43	69.81	2.11	7.37	14.01	48.35	71.84		70.19
				152.10	394.39	674.59	16.81		63.30	449.57	496.65	2 322.25		4 570	
89	20-30	8.5	6.9	7.33	30.45	35.58	0.39	73.75	2.41	7.95	15.13	50.59	76.08		66.53
				146.89	369.97	818.34	15.25		72.30	484.95	536.36	2 429.84		4 874	
90	30-40	8.6	5.3	10.63	21.60	27.51	0.27	60.01	4.46	9.37	14.10	30.22	58.15		31.91
				213.02	262.44	632.73	10.56		133.80	271.57	499.85	1 451.47		3 775	
91	40-50	8.6	4.5	12.29	16.92	22.45	0.19	51.85	5.49	10.44	14.16	20.71	50.80		25.62
				246.29	205.58	516.35	7.43		164.70	636.84	501.97	994.70		3 274	
92	50-60	8.7	3.6	7.36	12.19	19.63	0.13	39.31	3.30	7.26	10.36	18.66	39.58		26.73
				147.49	148.11	451.49	5.08		99.00	442.30	367.26	896.24		2 558	
93	60-70	8.8	2.5	4.24	8.81	16.69	0.13	29.87	3.59	7.19	10.93	8.32	30.03		27.14
				84.97	107.04	383.87	5.08		107.70	438.59	387.47	399.61		1 914	
94	70-80	8.8	2.3	6.13	5.01	12.86	0.15	24.15	2.97	5.93	10.38	5.09	24.37		21.05
				122.84	60.87	295.78	5.86		89.10	361.73	367.97	244.47		1 549	
95	80-90	8.7	2.3	5.59	5.84	12.36	0.18	23.97	2.92	4.39	10.23	5.64	23.18		16.61
				112.02	70.96	284.28	7.04		87.60	267.79	362.65	270.89		1 463	
96	90-100	8.6	1.8	1.97	6.06	13.37	0.17	21.57	2.79	4.19	9.77	4.19	20.94		23.24
				39.48	73.63	307.51	6.65		83.70	255.59	346.35	201.25		1 314	

La DR más alta se presenta en los perfiles P-7 y P-8; en el primero oscila de 2.13 a 2.42 Mg m⁻³ en los primeros 40 cm; y de 2.11 a 2.12 Mg m⁻³ en las capas más profundas (70 a 100 cm), mostrando una asociación negativa con la profundidad; esto se debe a la presencia de sustancias húmicas principalmente en las capas más profundas.

El % de espacio poroso fue más alto en los perfiles P-7 y P-8; en el primero los valores oscilan de 75.65 a 79.30 en los primeros 40 cm de profundidad y de 77.26 a 78.74% en las capas más profundas. En el P-8, el % de espacio poroso oscila de 72.47 a 74.76 en los primeros 40 cm hasta 85.69 y 85.78 %, mostrando una correlación positiva con la profundidad y % arcillas y una correlación negativa con la DA y % limos; esto se debe a la presencia de sedimentos lacustres.

La clase textural en los perfiles P-6 y P-7 es migajón limoso, franco, migajón arcillo arenoso y arcilloso. Mientras que en el P-8 la textura es migajón arcilloso y arcilla a lo largo de todo el perfil.

La más alta correlación se obtuvo en el P-6; en dicho análisis se mostró que el porcentaje de arena tiene una asociación positiva con la profundidad; MO; CIC; Mg^{2+} y Na^+ intercambiables.

El porcentaje de MO es más alto en el P-6 con valores que oscilan de 12.58 a 14.60%, en los primeros 40 cm; y de 49.42, a 54.86% en las capas de 80 a 110 cm de profundidad. El análisis de correlación mostró que el porcentaje de MO tiene correlación positiva con la profundidad; CIC y Mg^{2+} .

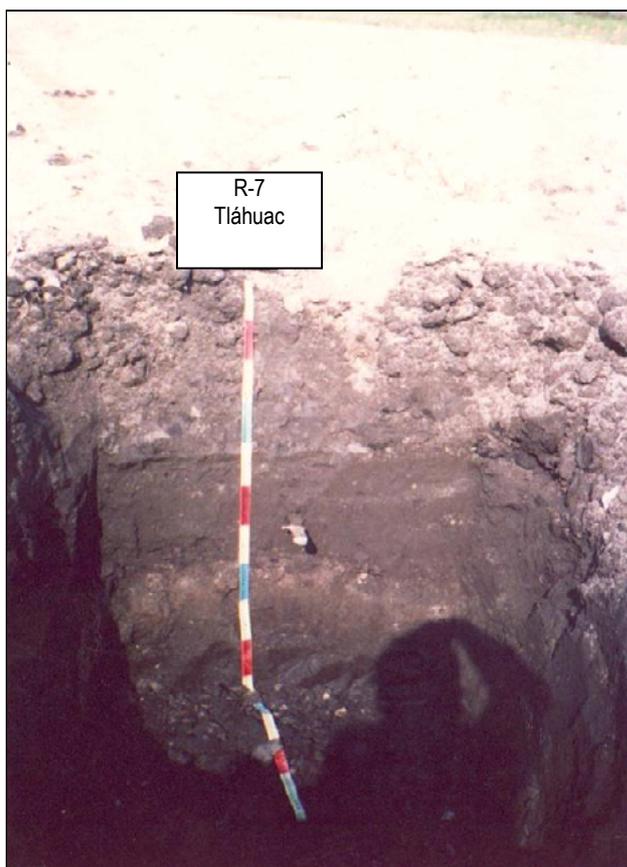


Figura 7.10 Vista morfológica del P-7, localizado en Tiáhuac, D.F. Nótese las costras blancas en la capa superficial.

El pH en los perfiles P-6, P-7, y P-8 en la relación 1:10 oscila de 8.6 a 9.2 en los primeros 50 cm de profundidad hasta 7.7 en las capas más profundas; esto se explica por la gran cantidad de sales como $CaCO_3$, $MgCO_3$, Na_2CO_3 , $NaCl$, HCO_3 . La presencia de sales alcalinas o básicas se debe al intemperismo de los minerales o bien a la adición de compuestos fertilizantes. El análisis de correlación de Pearson indicó que hay una asociación positiva con la CE y PSI.

La CIC en el P-6 osciló de 54.67 a 56.48 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 40 cm y de 108.1 a 134.7 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 80 a 110 cm de profundidad. En el P-7 osciló de 36.81 a 97.16 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 30 a 40 cm y de 33.01 a 35.21 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 80 a 100 cm de profundidad.

Finalmente en el P-8 varía de 48.24 a 75.57 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 0 a 40 cm y de 30.90 a 52.11 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 130 a 150 cm de profundidad. En los 3 perfiles hubo una correlación positiva con MO, cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ intercambiables y una correlación negativa con los contenidos de arcilla.

Los iones de Ca^{2+} intercambiable más altos se obtuvieron en el P-6 con valores que fluctúan de 54.88 a 70.56 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 0 a 40 cm y de 52.64 y 47.04 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 90 a 110 cm de profundidad; el análisis de correlación tuvo una asociación positiva con el pH del extracto de saturación. Le sigue el P-8 con valores de 51.06 a 75.48 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 40 cm de profundidad y de 26.64 y 17.76 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 130 a 150 cm de profundidad, con una correlación negativa con el Mg^{2+} , Na^+ , K^+ intercambiables, CE y PSI.

Los iones de Mg^{2+} intercambiables más altos se obtuvieron en el P-6 con valores que fluctúan de 31.56 a 44.98 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 50 cm hasta valores que oscilan de 75.97 a 94.69 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 70 a 110 cm de profundidad, con una correlación positiva con la profundidad; MO y CIC; y una asociación negativa con el pH del extracto de saturación; CE y PSI.

Los iones de Na^+ intercambiables más altos se presentaron en el P-8 con valores de 23.91 a 105.97 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 0 a 40 cm de profundidad y de 3.52 a 4.89 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ de 130 a 150 cm; el análisis de correlación tuvo una asociación positiva con el pH en H_2O 1:5; pH con KCl 1:5 y 1:10; K^+ intercambiable, CE y PSI.

Los iones de K^+ intercambiables más altos se presentaron en el P-8 con valores que fluctúan de 1.15 a 2.31 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en los primeros 40 cm de profundidad, hasta 1.01 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$ en la capa más profunda (140 a 150 cm). El análisis de correlación tuvo una asociación positiva con la CIC, Ca^{2+} ; Mg^{2+} y Na^+ intercambiables, CE y PSI.

La CE más alta es en el P-8, que fluctúan de 5.8 a 43.9 mS cm^{-1} en los primeros 50 cm de profundidad, hasta valores de 1.8 y 1.4 mS cm^{-1} de 120 a 150 cm de profundidad. El análisis de correlación tuvo una asociación positiva con el pH en H_2O 1:5, CIC; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+ y K^+ intercambiables y PSI. La CE, más baja fue en el P-7 con valores que fluctúan de 4.5 a 11.0 mS cm^{-1} en los primeros 50 cm y de 3.6 a 1.8 mS cm^{-1} de 50 a 100 cm. El análisis de correlación mostró una asociación positiva con el pH en H_2O 1:5 y 1:10; pH en KCl 1:5 y respectivamente; CIC; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+ y K^+ intercambiables, y PSI.

Cuadro 7.15. Propiedades físicas y químicas del P-8 Tláhuac, D.F.

Muestra	Profundidad	Color						Textura					pH				Cationes Intercambiables				
		Seco	Húmedo	H	D.A.	D.R.	Por.	Ar	Li	Arc	M.O.	C	H ₂ O		KCl		CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
No.	cm			%	Mg m ⁻³		%	%			%		1:5	1:10	1:5	1:10	cmol(+)kg ⁻¹				
97	0-10	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	81.59	0.60	2.20	72.72	22.6	58.0	19.4	10.41	6.03	8.6	8.8	8.3	8.4	75.57	75.48	61.65	105.97	2.31
98	10-20	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	110.36	0.54	2.14	74.76	22.6	56.0	21.4	11.34	6.58	8.6	8.9	8.2	8.3	48.24	43.29	36.57	41.30	1.47
99	20-30	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	89.95	0.59	2.15	72.55	24.6	42.0	33.4	11.19	6.49	8.6	9.0	8.3	8.4	50.45	46.62	33.44	30.43	1.15
100	30-40	10YR 5/1 Gris oscuro	10YR 2/1 Negro	83.73	0.60	2.18	72.47	22.6	38.0	39.4	10.10	5.85	8.7	9.1	8.4	8.5	51.25	51.06	28.21	23.91	1.24
101	40-50	10YR 5/3 Pardo	10YR 2/1 Negro	75.39	0.62	2.15	71.16	20.6	40.0	39.4	10.10	5.85	8.7	9.2	8.4	8.6	52.86	41.07	29.26	18.04	0.73
102	50-60	10YR 5/3 Pardo	10YR 2/1 Negro	77.60	0.63	2.17	70.97	16.6	42.0	41.4	9.32	5.40	8.4	9.0	8.1	8.2	50.25	35.52	26.12	13.91	0.23
103	60-70	10YR 5/3 Pardo	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	82.01	0.61	2.21	72.39	18.6	40.0	41.4	8.24	4.78	8.0	8.6	7.7	7.8	46.23	29.97	22.99	6.41	0.15
104	70-80	10YR 5/2 Pardo grisáceo	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	89.73	0.52	2.14	75.70	18.6	40.0	41.4	10.41	6.03	7.9	8.5	7.5	7.6	46.23	31.08	22.99	6.04	0.19
105	80-90	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	122.39	0.46	2.09	77.99	24.6	40.0	35.4	10.25	5.94	7.8	8.5	7.3	7.3	41.20	28.86	18.81	5.00	0.39
106	90-100	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	111.12	0.42	2.24	81.25	24.6	32.0	43.4	9.95	5.77	7.8	8.5	7.2	7.2	40.80	24.42	30.30	4.61	0.75
107	100-110	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	105.58	0.49	2.25	78.22	24.4	37.8	37.8	10.57	6.13	7.6	8.3	7.2	7.1	41.61	27.75	20.90	4.52	1.28
108	110-120	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	109.92	0.49	2.31	78.79	26.4	37.8	35.8	11.03	6.39	7.5	8.1	7.0	7.1	42.42	24.42	21.94	4.35	1.51
109	120-130	10YR 4/1 Gris oscuro	7.5YR 2/0 Negro	129.54	0.53	2.18	75.68	26.4	41.8	31.8	23.15	13.15	7.1	7.7	6.8	6.8	68.27	42.18	40.75	5.09	1.87
110	130-140	10YR 6/1 Gris	10YR 3/1 Gris muy oscuro	163.10	0.32	2.09	84.69	18.4	31.8	49.8	15.69	9.10	7.1	7.7	6.8	6.7	52.11	26.64	25.08	4.89	1.47
111	140-150	10YR 6/1 Gris	10YR 3/1 Gris muy oscuro	166.37	0.31	2.11	85.78	18.4	17.6	64.0	10.10	5.85	7.2	7.8	6.8	6.7	30.90	17.76	14.63	3.52	1.01

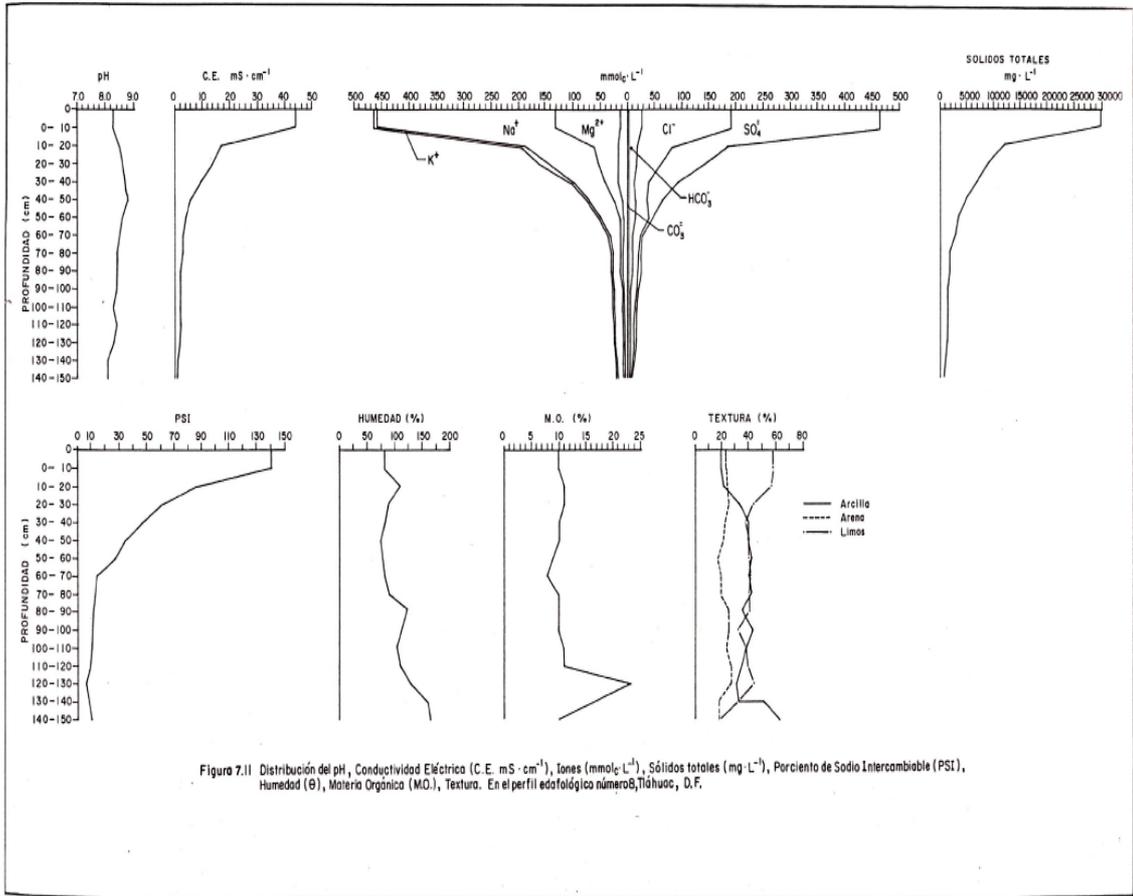


Figura 7.11 Distribución del pH, Conductividad Eléctrica (C.E. mS·cm⁻¹), Iones (mmol·L⁻¹), Sólidos totales (mg·L⁻¹), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), Humedad (θ), Materia Orgánica (M.O.), Textura. En el perfil edafológico número 8, Tláhuac, D.F.

Cuadro 7.16. Composición iónica del extracto de saturación del P-8 Tláhuac, D.F.

Muestra	Profundidad	pH	C.E. mS cm ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	SUMA	PSI
No.	cm			mmol _c L ⁻¹								mmol _c L ⁻¹	mg L ⁻¹		
97	0-10	8.3	43.9	11.73	121.05	323.89	4.83	461.50	3.31	23.20	166.72	273.13	466.36		140.23
				235.07	1 470.76	7 449.47	188.85		99.30	1 415.20	5 910.22	13 118.43		29 887	
98	10-20	8.5	17.3	16.24	46.66	122.07	1.71	186.68	1.60	17.60	64.94	104.18	188.32		85.61
				325.45	566.92	2 807.61	66.86		48.00	1 073.60	2 302.12	5 003.77		12 19	
99	20-30	8.6	13.8	15.68	39.76	85.87	1.15	142.46	1.41	14.79	45.04	83.87	145.11		60.31
				314.23	483.08	1 975.01	44.97		42.30	902.19	1 596.67	4 028.28		9 387	
100	30-40	8.7	9.7	16.42	25.24	55.76	0.63	98.05	2.34	10.53	28.29	53.61	94.77		46.65
				329.06	306.67	1 282.48	24.63		70.20	642.33	1 002.88	2 574.89		6 233	
101	40-50	8.9	5.8	8.95	14.94	44.53	0.30	68.72	2.67	12.67	21.32	29.70	66.36		34.13
				179.36	181.52	1 024.19	11.73		80.10	772.87	755.79	1 426.49		4 432	
102	50-60	8.6	4.2	6.35	12.53	30.41	0.14	49.43	2.35	12.35	17.36	15.62	47.68		27.68
				127.25	152.24	699.43	5.47		70.50	753.35	615.41	750.23		3 174	
103	60-70	8.5	2.9	4.57	8.04	17.00	0.10	29.71	2.21	8.29	14.95	4.73	30.18		13.86
				91.58	97.69	391.0	3.91		66.30	505.69	529.98	227.18		1 913	
104	70-80	8.4	2.6	4.57	6.44	16.02	0.09	27.12	2.16	7.57	13.74	4.17	27.64		13.05
				91.58	78.25	368.46	3.52		64.80	461.77	487.08	200.29		1 756	
105	80-90	8.4	2.3	6.59	4.96	15.53	0.20	27.28	2.15	8.06	11.02	5.53	26.76		12.13
				132.06	60.26	357.19	7.82		64.50	491.66	390.66	265.61		1 770	
106	90-100	8.4	2.0	4.07	5.69	13.18	0.26	23.20	1.01	6.57	12.84	3.46	23.88		11.29
				81.56	69.13	303.14	10.17		30.30	400.77	455.18	166.18		1 516	
107	100-110	8.3	1.9	4.37	4.32	12.06	0.40	21.15	1.02	5.10	11.71	2.62	20.45		10.86
				81.57	52.49	277.38	15.64		30.60	311.10	415.12	125.84		1 310	
108	110-120	8.4	1.9	3.08	3.71	13.50	0.41	20.70	0.83	6.20	7.79	5.67	20.49		10.25
				61.72	45.08	310.50	16.03		24.90	378.20	276.16	272.33		1 385	
109	120-130	8.3	1.8	2.60	3.65	13.56	0.58	20.39	0.00	6.03	8.13	5.54	19.70		7.46
				52.10	44.35	311.88	22.68		0.00	367.83	288.21	266.09		1 353	
110	130-140	8.1	1.4	3.84	1.13	11.15	0.59	16.71	0.00	4.35	8.31	4.34	17.00		9.38
				76.95	13.73	256.45	23.07		0.00	265.35	294.59	208.45		1 139	
111	140-150	8.1	1.4	3.27	1.61	10.13	0.61	15.62	0.00	3.66	8.11	4.39	16.16		11.39
				65.53	19.56	232.99	23.85		0.00	223.26	287.50	210.85		1 064	

En el P-8 se presentaron los más altos contenidos de cationes y aniones solubles: Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , y HCO_3^- con valores de 323.89, 121.05, 4.83, 273.13, 166.72 y 23.20 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ respectivamente. Mientras que los niveles de Ca^{2+} más altos se presentaron en el P-6 con un valor de 16.96 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; y CO_3^{2-} con un valor de 5.49 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ en el P-7.

Los valores del PSI más altos obtenidos se obtuvieron en el P-8 con valores que fluctúan de 140.23 a 34.13 en los primeros 50 cm; hasta 7.46, 9.38 y 11.39 de 120 a 150 cm de profundidad. El análisis de correlación tuvo una asociación positiva con el pH en H_2O 1:5 y 1:10, pH con KCl 1:5 y 1:10; CIC; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+ y K^+ intercambiables.

De acuerdo al Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, estos suelos se clasifican como salinos-sódicos en los primeros 70, 50 y 60 cm en los perfiles P-6, P-7 y P-8 respectivamente; sódicos de 50 a 100 cm en el perfil P-7; salinos de 70 a 110 cm en el perfil P-6; y normales de 60 a 150 cm de profundidad en el perfil P-8; éste último por presentar conductividades eléctricas $<4.0 \text{ mS cm}^{-1}$ y PSI <15 (Richards, 1985).

7.1.4. Mixquic

Los resultados de las propiedades físicas y químicas de los perfiles P-9 y P-10 se muestran en los Cuadros 7.17. y 7.19.

Los resultados de cationes y aniones solubles de los perfiles P-9 y P-10 se muestran en los Cuadros 7.18. y 7.20.

La distribución gráfica de los 2 perfiles se muestra en las Figuras 7.12. y 7.13.

La matriz de correlación de Pearson de los 2 perfiles se muestra en el Apéndice A, Cuadros A9 y A10.

Los resultados de las concentraciones de los tipos de sales en los perfiles P-9 y P-10 se muestran en el Apéndice B, Cuadros B9 y B10.

La distribución gráfica de los tipos de sales de los 2 perfiles se muestran en la Figura 7.18.

El color del suelo en los perfiles P-9 y P-10, va de pardo grisáceo 10YR 5/2; pardo grisáceo claro 10YR 6/2; gris 10YR 6/1 y 5/1; en seco y el color en húmedo es negro 10YR 2/1; gris muy oscuro; 10YR 3/1; pardo muy oscuro 10YR 2/2; y pardo grisáceo muy oscuro 10YR 3/2.

El porcentaje de humedad más alto se presentó en el perfil P-10 con valores que fluctúan de 111.49 a 148.70% en los primeros 50 cm y de 333.90 a 373.45% en las capas más profundas (100 a 140 cm de profundidad), con una correlación positiva con la profundidad; % porosidad; % limos y MO respectivamente.

La DA fue más alta en el perfil P-9 con valores que fluctúan de 0.53 a 0.58 Mg m^{-3} en los primeros 40 cm y de 0.41 a 0.39 Mg m^{-3} de 70 a 90 cm de profundidad.

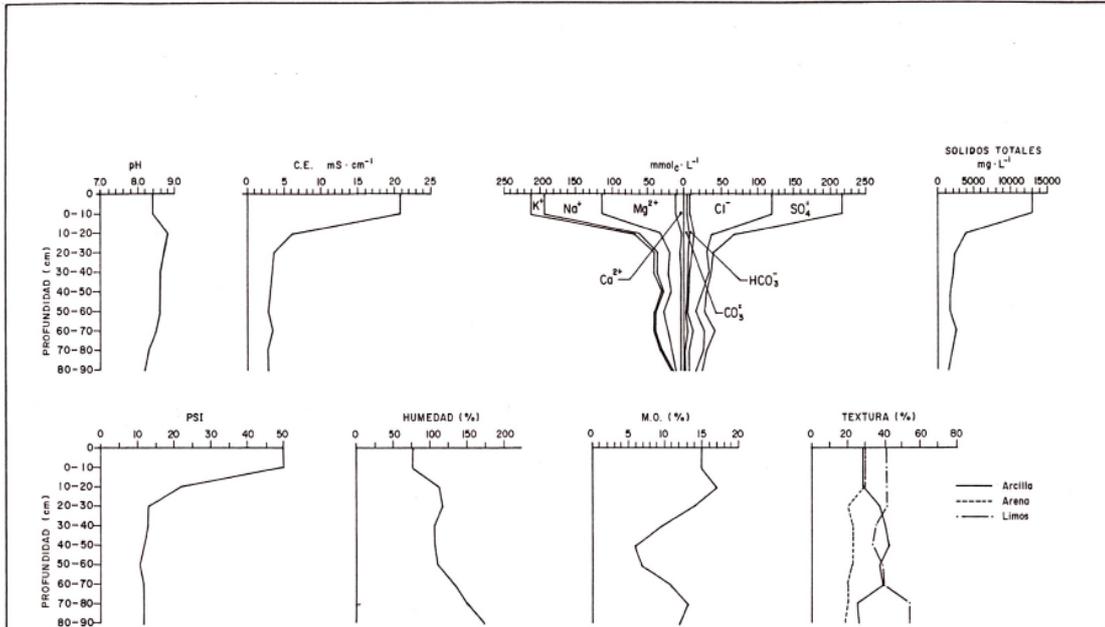


Figura 7.12 Distribución del pH, Conductividad Eléctrica (C.E. $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$), Iones ($\text{mmolc} \cdot \text{L}^{-1}$), Sólidos totales ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), Humedad (θ), Materia Orgánica (M.O.), Textura. En el perfil edafológico número 9, Mixquic, D.F.

Cuadro 7.18. Composición iónica del extracto de saturación del P-9 Mixquic, D.F.

Muestra	Profundidad	pH	C.E.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA	SUMA	PSI	
No.	Cm		mS cm ⁻¹	mmolc L ⁻¹										mmolc L ⁻¹	mg L ⁻¹	
112	0-10	8.4	20.9	11.15	103.20	81.16	17.30	212.81	3.97	3.97	113.50	94.19	215.63		49.77	
				223.45	1 253.88	1 866.68	676.43		119.10	242.17	4 023.58	4 523.95		12 929		
113	10-20	8.8	6.3	4.03	30.11	27.18	5.95	67.27	6.90	6.90	23.33	32.49	69.62		21.79	
				80.76	365.84	625.14	232.65		207.00	420.90	827.05	1 560.50		4 319		
114	20-30	8.7	3.6	5.39	14.02	16.83	3.68	39.92	5.48	5.48	20.22	9.97	41.15		13.18	
				108.02	170.34	387.09	143.89		164.40	334.28	716.80	478.86		2 504		
115	30-40	8.6	3.4	4.40	15.90	16.45	2.85	39.60	4.92	4.92	24.87	3.51	38.22		13.30	
				88.18	193.19	378.35	111.44		147.60	300.12	881.64	168.58		2 269		
116	40-50	8.6	3.1	3.99	13.53	12.50	1.98	32.00	3.75	3.75	18.96	4.82	31.28		11.98	
				79.96	164.39	287.50	77.42		112.50	228.75	672.13	231.50		1 854		
117	50-60	8.6	2.9	3.08	13.33	11.05	1.88	29.34	2.09	2.09	12.45	12.11	28.74		11.41	
				61.72	161.96	254.15	73.51		62.7	127.49	441.35	581.64		1 765		
118	60-70	8.5	3.4	4.34	18.45	14.82	2.46	40.07	5.84	5.84	16.16	13.13	40.97		11.69	
				86.97	224.17	340.86	96.19		175.20	356.24	572.87	630.63		2 483		
119	70-80	8.3	2.8	2.73	13.45	12.99	2.78	31.95	3.64	3.64	19.38	5.44	32.10		12.21	
				54.71	163.42	298.77	108.70		109.20	222.04	687.02	261.28		1 905		
120	80-90	8.2	2.8	3.69	11.67	12.11	2.06	29.53	3.73	3.73	12.73	9.58	29.77		11.73	
				73.95	141.79	278.53	80.55		111.90	227.53	451.28	460.13		1 826		

El % espacio poroso más alto fue en el P-10 con valores que fluctúan de 74.37 a 78.32% de 0 a 50 cm de profundidad; y de 86.66 a 87.36% de 120 a 140 cm de profundidad, mostrando una correlación positiva con la profundidad; % limos y MO.

La clase textural en el P-9 es migajón arcilloso; arcilla; y migajón limoso y en el P-10 es franco; migajón arcilloso; arcilla y migajón limoso. En el P-9 el porcentaje de arena tiene una correlación positiva con el Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ y K⁺ intercambiables.

En el perfil P-10, las partículas de arena tienen correlación positiva con Ca²⁺; Mg²⁺; Na⁺ y K⁺ intercambiables.

En el P-10 se observan los contenidos de MO más altos con valores que fluctúan de 13.36 a 19.27% en los primeros 40 cm de profundidad; hasta valores de 30.77 a 35.59 de 100 a 140 cm de profundidad.

El análisis de correlación mostró que la MO tiene una asociación positiva con la profundidad; % de espacio poroso; y % limos y una asociación negativa con la DA; DR; arcilla; pH en H₂O 1:5 y 1:1; pH en KCl 1:5 y 1:10; Ca²⁺ intercambiable y pH del extracto de saturación.

En el P-9 el pH en H₂O 1:5 es más alto comparado con el P-10, con valores que fluctúan de moderadamente alcalino 8.7 y 8.6 de 0 a 40 cm de profundidad a 7.4 ligeramente alcalino en las capas más profundas (80 a 90 cm); el pH en H₂O 1:10 fluctúa de 8.7 y 8.8 moderadamente alcalino en las capas más profundas a 7.6 ligeramente alcalino de 80 a 90 cm; y con KCl disminuye una unidad.

El análisis de correlación mostró que el pH con H₂O y con KCl relación 1:5 tiene una asociación positiva con Ca²⁺ Mg²⁺ intercambiable y un asociación negativa con la profundidad.

Los valores de la CIC mas alta se observan en el P-10 con valores de 62.45 a 76.59 cmol(+)kg⁻¹ en los primeros 50 cm y de 50.21 a 54.43 cmol(+)kg⁻¹ de 110 a 140 cm de profundidad.

Le sigue el P-9 con valores que fluctúan de 50.82 a 65.94 cmol(+)kg⁻¹ de 0 a 40 cm de profundidad y de 50.19 a 52.92 cmol(+)kg⁻¹ de 70 a 90 cm.

Los valores de Ca²⁺ intercambiable son altos en ambos perfiles. En el P-9 oscila de 45.51 a 57.72 cmol(+)kg⁻¹ en los primeros 40 cm hasta valores de 28.86 y 25.53 cmol(+)kg⁻¹ de 70 a 90 cm de profundidad. Ver Cuadro 7.17. El análisis de correlación mostró que el Ca²⁺ intercambiable tuvo una asociación positiva con el pH en H₂O 1:5 y 1:10; pH en KCl 1:5 y 1:10. Una asociación negativa con la profundidad y % limos.

En el P-10 el Ca²⁺ intercambiable oscila de 36.63 a 58.83 cmol(+)kg⁻¹ de 0 a 50 cm de profundidad; por lo que presenta una correlación positiva con pH en H₂O 1:5 y 1:10; pH en KCl 1:5 y 1:10; Mg²⁺; Na⁺ y K⁺ intercambiable; pH del extracto de saturación y CE; con una correlación negativa con la profundidad; % limos y MO. Los valores de Mg²⁺ intercambiable son altos en ambos perfiles. En el P-9 oscila con valores de 32.91 a 56.43 cmol(+)kg⁻¹ de 0 a 40 cm de profundidad hasta valores de 19.85 y 23.51 cmol(+)kg⁻¹ de 70 a 90 cm de profundidad, mostrando una correlación positiva con el pH en KCl 1:5 y 1:10, CIC; Na⁺ y K⁺ intercambiables y PSI, con una correlación negativa con la profundidad.

En el P-10 los valores fluctúan de 35.53 a 74.19 cmol(+)kg⁻¹ en los primeros 50 cm de profundidad y de 26.12 a 30.30 cmol(+)kg⁻¹ de 110 a 140 cm de profundidad. Ver Cuadro 7.19. En el análisis de correlación el Mg²⁺ intercambiable tuvo una asociación positiva con el % arcilla; pH en KCl 1:5 y 1:10; CIC; Ca²⁺; Na⁺; y K⁺ intercambiables; CE y PSI con una correlación negativa con la profundidad.

Los contenidos de Na⁺ intercambiable más altos se presentan en el P-10 con valores que fluctúan de 21.73 a 52.82 cmol(+)kg⁻¹ de 0 a 40 cm de profundidad a valores de 19.34 y 18.69 cmol(+)kg⁻¹ en las capas más profundas (120 a 140 cm). Ver Cuadro 7.19. En el análisis de correlación, el Na⁺ intercambiable tuvo una asociación positiva con Ca²⁺; Mg²⁺ y K⁺ intercambiables; CE y PSI; con una correlación negativa con la profundidad.

Los contenidos de K⁺ intercambiable más altos se presentan en el P-9 con valores de 3.51 a 12.43 cmol(+)kg⁻¹ de 0 a 40 cm de profundidad hasta valores que fluctúan de 2.94 a 3.00 cmol(+)kg⁻¹ de 60 a 90 cm (ver Cuadro 7.17); presentando una correlación positiva con el % arena; MO; CIC; Mg²⁺ y Na⁺ intercambiables; CE y PSI; con una correlación negativa con la profundidad.

Cuadro 7.19. Propiedades físicas y químicas del P-10 Mixquic, D.F.

Muestra	Profundidad	Color						Textura					pH				Cationes Intercambiables				
		Seco	Húmedo	H	D.A.	D.R.	Por.	Ar	Li	Arc	M.O.	C	H ₂ O		KCl		CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
No.	Cm			%	Mg m ⁻³		%	%			%		1:5	1:10	1:5	1:10	cmol(+)/kg ⁻¹				
121	0-10	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	111.49	0.51	1.99	74.37	34.4	42.0	23.6	19.27	11.47	8.4	8.5	8.3	8.4	76.59	58.83	74.19	52.82	2.25
122	10-20	10YR 5/1 Gris	10YR 2/1 Negro	113.01	0.50	2.00	75.00	34.4	42.0	23.6	19.27	11.17	8.3	8.5	8.1	8.2	68.99	56.61	49.11	28.69	0.89
123	20-30	10YR 5/1 Gris	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	113.84	0.47	1.98	76.26	32.4	38.0	29.6	16.16	9.37	8.3	8.5	8.0	8.1	67.30	48.64	45.98	23.26	0.73
124	30-40	10YR 6/1 Gris	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	128.11	0.44	2.03	78.32	22.4	38.0	39.6	13.36	7.74	8.5	8.6	7.9	8.0	62.45	36.63	36.57	21.73	0.60
125	40-50	10YR 6/2 Gris pardusco claro	10YR 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	148.7	0.44	2.03	78.32	28.4	36.0	35.6	13.05	7.57	8.4	8.6	7.9	8.0	63.08	41.07	35.53	20.87	0.67
126	50-60	10YR 6/2 Gris pardusco claro	10YR 3/2 Pardo grisáceo muy oscuro	168.05	0.41	2.03	79.80	20.4	40.0	39.6	14.3	8.29	8.4	8.5	7.8	7.8	62.03	43.29	29.26	19.34	0.39
127	60-70	10YR 6/2 Gris pardusco claro	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	181.46	0.40	2.00	80.00	20.4	38.0	41.6	15.69	9.1	8.4	8.6	7.8	7.8	65.83	41.07	34.48	18.69	0.39
128	70-80	10YR 6/1 Gris	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	183.38	0.39	1.94	79.89	20.4	38.0	41.6	16.31	9.46	8.2	8.4	7.7	7.7	63.93	42.18	33.44	17.39	0.51
129	80-90	10YR 6/1 Gris	10YR 2/1 Negro	215.83	0.37	1.90	80.52	28.8	34.0	37.2	19.73	11.44	8.0	8.2	7.5	7.5	64.56	39.96	36.57	18.04	0.47
130	90-100	10YR 6/1 Gris	10YR 2/1 Negro	228.14	0.33	1.88	82.45	22.4	46.0	31.6	28.44	16.49	7.7	7.9	7.3	7.4	75.74	41.07	38.66	17.39	0.51
131	100-110	10YR 6/1 Gris	10YR 2/2 Pardo muy oscuro	353.74	0.30	1.79	83.24	22.4	56.0	21.6	31.23	18.11	7.5	7.7	6.9	7.0	64.56	41.07	32.39	19.34	0.55
132	110-120	10 YR 6/1 Gris	10 YR 2/2 Pardo muy oscuro	333.90	0.25	1.69	85.20	24.4	60.0	15.6	35.59	20.64	6.3	6.4	6.2	6.3	54.00	29.97	28.21	20.87	0.47
133	120-130	10 YR 6/1 Gris	10 Y R 2/2 Pardo muy oscuro	359.74	0.24	1.80	86.66	22.4	64.0	13.6	33.88	19.65	5.8	5.9	5.8	5.9	54.43	25.53	30.30	19.34	0.47
134	130-140	10 YR 6/1 Gris	10 YR 2/2 Pardo muy oscuro	373.45	0.23	1.82	87.36	22.4	62.0	15.2	30.77	17.84	6.0	6.1	5.9	6.1	50.21	23.31	26.12	18.69	0.53

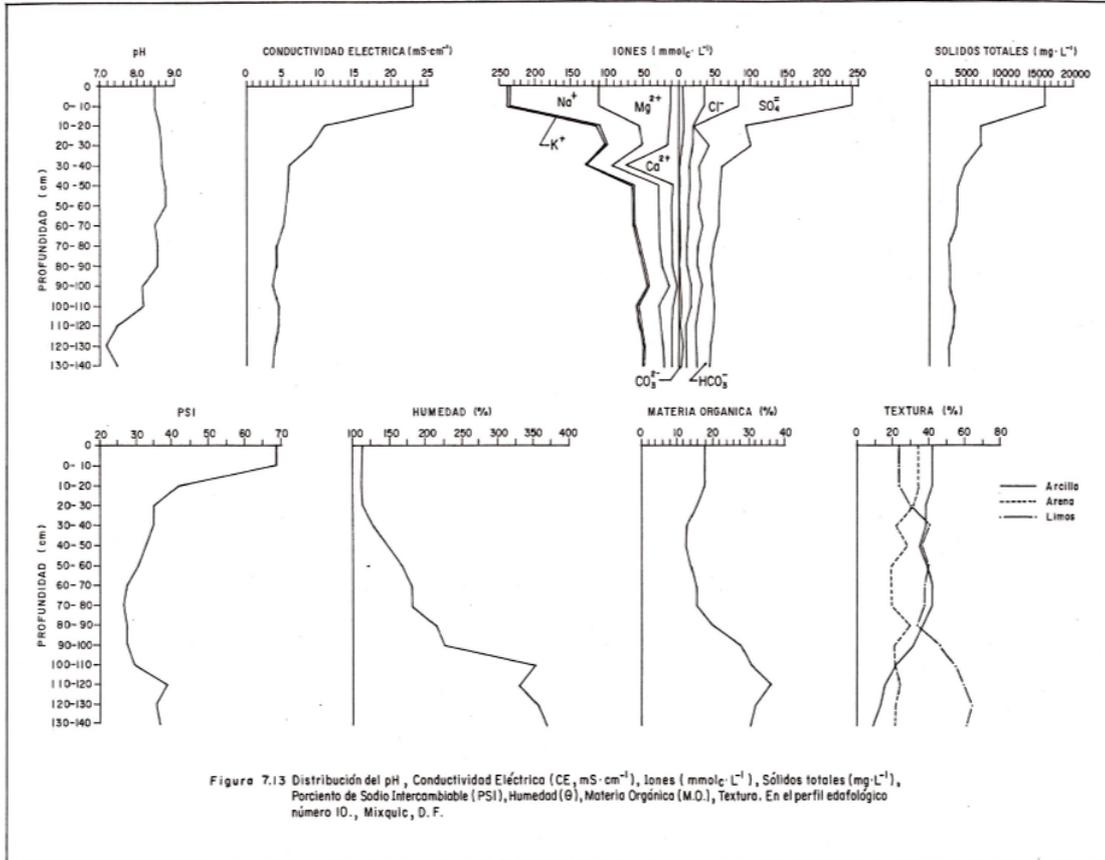


Figura 7.13 Distribución del pH, Conductividad Eléctrica (CE, mS·cm⁻¹), Iones (mmol·L⁻¹), Sólidos totales (mg·L⁻¹), Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI), Humedad (θ), Materia Orgánica (M.O.), Textura. En el perfil edafológico número 10., Mixquic, D. F.

Cuadro 7.20. Composición iónica del extracto de saturación del P-10 Mixquic, D.F.

Muestra	Profundidad	pH	C.E.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SUMA	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	SUMA		PSI	
No.	cm		mS cm ⁻¹	mmolc L ⁻¹										mmolc L ⁻¹	mg L ⁻¹	
121	0-10	8.5	23.0	13.45	97.93	124.11	3.72	239.21	6.49	29.87	48.99	155.78	241.13	15 695	68.96	
				269.54	1 189.85	2 854.53	145.45		194.70	1 822.07	1 736.70	7 482.11				
122	10-20	8.6	11.2	13.92	44.96	53.89	0.79	113.56	7.02	15.20	23.02	70.15	115.39	7 419	41.58	
				278.96	546.26	1 239.47	30.89		210.60	927.20	816.06	3 369.30				
123	20-30	8.7	9.2	15.86	35.94	47.95	0.63	100.38	5.37	16.11	22.56	59.23	103.27	6 670	34.56	
				317.83	436.67	1 102.85	24.63		161.10	982.71	799.75	2 844.82				
124	30-40	8.7	6.2	7.18	18.81	37.40	0.36	63.75	3.33	12.22	14.12	32.37	62.04	4 147	34.79	
				143.89	228.54	860.20	14.08		99.9	745.42	500.55	1 554.73				
125	40-50	8.8	6.0	8.37	20.07	34.50	0.42	63.36	3.77	13.84	14.96	28.56	61.13	4 081	33.08	
				167.73	243.85	793.50	16.42		113.10	844.24	530.33	1 371.74				
126	50-60	8.8	5.6	10.37	17.56	31.97	0.26	60.16	2.45	12.27	15.60	28.38	58.70	3 905	31.17	
				207.81	213.35	735.31	10.17		73.50	748.47	553.02	1 363.09				
127	60-70	8.5	5.4	9.02	17.44	33.45	0.27	60.18	3.95	11.84	18.34	24.80	58.93	3 855	28.39	
				180.76	211.90	769.35	10.56		118.50	722.24	650.15	1 191.14				
128	70-80	8.6	4.4	7.89	17.23	26.12	0.23	51.48	4.82	9.64	14.33	24.26	53.05	3 382	27.20	
				158.12	209.34	600.12	8.99		144.60	588.04	507.99	1 165.21				
129	80-90	8.6	4.5	8.26	14.85	24.41	0.29	47.81	2.42	12.12	12.92	21.81	49.27	3 236	27.94	
				165.53	180.43	561.43	11.34		72.60	739.32	458.01	1 047.53				
130	90-100	8.2	4.1	8.95	11.55	27.09	0.40	47.99	4.32	13.67	15.93	16.02	49.94	3 256	22.96	
				179.36	140.33	623.07	15.64		129.60	833.87	564.72	769.44				
131	100-110	8.2	4.7	7.29	18.83	29.40	0.50	56.02	5.71	13.14	14.53	22.03	55.41	3 617	29.96	
				146.09	228.78	676.20	19.55		171.30	801.54	515.09	1 058.10				
132	110-120	7.5	4.7	7.66	16.37	29.58	0.51	54.12	4.03	8.05	13.76	27.60	53.44	3 478	38.64	
				153.51	198.90	680.34	19.94		120.90	491.05	487.79	1 325.63				
133	120-30	7.2	4.2	5.81	16.85	25.51	0.50	48.67	6.62	6.62	13.03	23.26	49.53	3 109	35.53	
				116.43	204.73	586.73	19.55		198.60	403.82	461.91	1 117.18				
134	130-140	7.5	4.0	6.43	13.95	24.00	0.47	44.85	6.37	7.64	13.06	16.92	43.99	2 802	37.22	
				128.86	169.49	552.00	18.38		191.10	466.04	462.98	812.67				



Figura 7.14. Vista morfológica del P-10, localizado en Míxquic, D.F. Se puede observar una gran cantidad de raíces.

La CE obtenida fue mayor de 4 mS cm^{-1} en el P-10 con valores que fluctúan de 6.2 a 23.0 mS cm^{-1} en los primeros 40 cm de profundidad; a valores que oscilan de 4.0 a 4.7 mS cm^{-1} en las capas más profundas (110 a 140 cm). Ver Cuadro 7.19. El análisis de correlación indicó que existe un asociación positiva con el pH con $\text{KCl } 1;10$; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^+ y K^+ intercambiables y PSI.

A diferencia del P-9, la CE fluctúa de 3.4 a 20.9 mS cm^{-1} en los primeros 40 cm de profundidad a valores de 2.8 en las capas más profundas (70 a 90 cm). El análisis de correlación mostró que la CE tiene una asociación positiva con Mg^{2+} , Na^+ y K^+ intercambiables y PSI.

El en P-9 se presentaron los más altos contenidos de cationes y aniones solubles: Mg^{2+} , K^+ y Cl^- con valores de 103.20 , 17.30 y $113.50 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ respectivamente. En el P-10 los cationes y aniones solubles más altos fueron: Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- con valores de 124.11 , 71.85 , 155.78 , 7.04 y $29.87 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ respectivamente.

Los valores de PSI más altos obtenidos se encuentran en el P-10 con valores que van de 33.08 a 68.96 en los primeros 50 cm de profundidad y de 35.53 a 38.64 en las capas más profundas (110 a 140 cm). Ver Cuadro 7.19. El análisis de correlación mostró que el PSI tiene una correlación positiva con Mg^{2+} ; Na^+ y K^+ intercambiables.

De acuerdo al Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, estos suelos se clasifican como salino-sódicos de 0a 20 cm y normal de 20 a 90 cm en el P-9; mientras que en el P-10 es salino-sódico a lo largo de todo el perfil.

7.1.5. Discusión de las propiedades físicas y químicas de los suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Míxquic, D.F.

Como se pudo observar, en la totalidad de los perfiles edafológicos de las zonas de estudio: Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Míxquic, D.F., el comportamiento que tienen los parámetros como la CE, PSI, pH, cationes intercambiables, cationes y aniones solubles, presentan una correlación positiva, esto se debe a los procesos de evapotranspiración en las capas superficiales.

La correlaciones negativas en las cuales la profundidad de los perfiles edafológicos es determinante se deben a que las concentraciones de las sales solubles en los suelos se aproximan a las concentraciones de las aguas freáticas.

En general los altos contenidos de humedad en los diferentes espesores edafológicos se deben a un mayor contenido de amorfos a medida que aumenta la profundidad.

Con relación a las propiedades físicas en los 4 sitios de los suelos estudiados se puede decir que el color negro se debe a la presencia de materia orgánica, principalmente ácidos húmicos por su elevada melanización y alto peso molecular, además la presencia de carbonato sódico en los suelos alcalinos causa tintes negruscos debido a la dispersión del humus. El color pardo oscuro es originado por el humus o el manganeso encontrándose éste último en estado de bióxido de manganeso.

Así mismo el color blanco se debe a la presencia de polimorfos de sílice de origen biogénico constituidos principalmente por diatomeas y fitolitos; a la mineralogía con abundancia de feldespatos como la ortoclasa, oligoclasa, albitas o anortitas y cuarzo procedentes de eventos volcánicos durante el cuaternario, a la ausencia de compuestos melanizados de materia orgánica y de óxidos e hidróxidos de Fe, (García *et al.*, 1994) como en todos lo

s perfiles estudiados.

Se presentan altos porcentajes de humedad esto se debe al drenaje interno deficiente que hay en la zona chinampera; además la concentración de sales tiende a variar inversamente, es decir a medida que aumenta la profundidad de cada perfil aumenta el contenido de humedad, pero los cationes y aniones solubles disminuyen; esto se debe a que las sales de Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} se solubilizan concentrándose principalmente en las capas más superficiales debido a la alta evapotranspiración.

El drenaje restringido es un factor que frecuentemente contribuye a la salinización de los suelos y que lleva consigo la presencia de una capa freática poco profunda o una baja permeabilidad del suelo. Estos suelos fueron enriquecidos con diversos materiales que al intemperizarse dejaron en solución abundantes cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ .

El agua hidroliza los macro y micronutrientes que la planta toma del suelo a través de la raíz, además la materia orgánica se fermenta y biodegrada fácilmente cuando la humedad es adecuada. Sin embargo cuando la acumulación de agua ocasiona problemas de anaerobiosis las raíces se pudren formando moteados color blanco, gris y algunas veces coloraciones verdes debido a los potenciales de reducción como resultado del drenaje impedido (Bohn *et al.*, 1993; Tan, 1998).

La DA en los 4 sitios disminuye con la profundidad debido a los altos niveles de materia orgánica originando que estos suelos tengan una mejor agregación y por lo tanto no haya compactación. El caso contrario ocurre cuando la compactación fuerza al material sólido dentro de los poros del suelo, esto reduce el espacio poroso y aumenta la densidad aparente. Las labores también aumentan la densidad aparente debido al descenso que se produce en el porcentaje de materia orgánica.

Los altos porcentajes de porosidad obtenidos en los sitios 1 al 3 se relacionan con los altos contenidos de carbono en la mayoría de los casos. Sin embargo debe tomarse en cuenta sus altos contenidos de Na^+ intercambiable que aunados a la cercanía del manto freático en la base del perfil limitan la difusión del aire provocando problemas de anaerobiosis y una baja permeabilidad (Baver, 1973; Hillel, 1998).

El contenido de limos en el sitio 1 es mayor de 35%, provocando que en estos suelos disminuya la velocidad de infiltración. En el sitio 3 el porcentaje de arena es mayor del 35%; originando que la capacidad de retención de humedad sea menor y tenga una buena permeabilidad. En el sitio 4 el porcentaje de limos es más elevado con valores $> 50\%$. Richards, (1985) señala que la presencia de un 50% o más de partículas de limo (2 a 5 μm de diámetro) es una causa de que los suelos tengan una permeabilidad relativamente baja. También existe evidencia de que algunas partículas del tamaño del limo y las que tienen forma laminar, reducen la permeabilidad más que las otras partículas. La difusión del oxígeno en el suelo baja considerablemente por el tamaño de poros, provocando que las raíces de las plantas mueran por procesos de anaerobiosis (Pizarro, 1978 y Aceves, 1979).

El pH del extracto de saturación en los 4 sitios estudiados va de fuertemente alcalino (8.6 a 8.8), en las capas superficiales, moderadamente alcalino (8.4), alcalino (8.0) y ligeramente alcalino (7.4) en las capas más profundas en los perfiles P-1, P-3, P-4 al P-10, excepto en el perfil P-2 del sitio 1 que presenta un pH ligeramente ácido (6.2 y 6.4) en las capas más profundas. Estas variaciones de pH se deben a la presencia de cationes alcalinos (Na^+ y K^+) y alcalinotérreos (Ca^{2+} y Mg^{2+}), esto quiere decir que son suelos que generalmente presentan Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NaCl , y Na_2SO_4 ; mientras que en el perfil P-2 disminuye la concentración de estas sales originando que los rangos de pH sean bajos.

Estos valores de pH alcalino originan que haya una mayor toxicidad de Na^+ , provocando que la actividad microbiana sea escasa, y que los micronutrientes (Fe^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , y Zn^{2+}) sean poco disponibles, y por lo tanto haya un mayor contenido de fosfatos fijados entre los valores de pH de 7.5 a 8.5

(Porta *et al.*, 1999). Sin embargo cuando el pH se eleva por arriba de 9.0 los fosfatos aumentan su disponibilidad. La presencia de sales alcalinas o básicas en la solución, se debe al intemperismo de los minerales ferromagnesianos y a los feldespatos de la serie de las plagioclasas, particularmente de la albita muy abundante en los sedimentos de las áreas estudiadas (Dixon y Weed, 1989; García *et al.*, 1994).

El contenido de materia orgánica es muy alto en los 4 sitios, y tiene una relación con la humedad del suelo, la cual propicia que los niveles de materia orgánica se mantengan muy elevados por el bajo contenido de oxígeno, que origina su inmovilización neta. Las moléculas orgánicas presentes en el suelo están parcialmente protegidas debido a la acción de los microorganismos y de esa manera se conservan los niveles altos. Además estas variaciones se deben al proceso de construcción y al manejo de cada chinampa, depositación progresiva de las plantas acuáticas, restos de la cosecha anterior y a la incorporación de lodos del fondo de los canales que rodean a cada chinampa. Además la materia orgánica contrarresta los efectos nocivos del Na⁺ intercambiable en los suelos. Duchaufour (1978), encontró que los suelos orgánico-húmiferos y turbosos con cantidades apreciables de Na⁺ intercambiable, tenían buenas condiciones físicas, por lo que en varias investigaciones se ha demostrado el efecto benéfico de la materia orgánica cuando ésta se aplica a los suelos sódicos.

La materia orgánica actúa como un agente de liberación continua de nutrimentos, interviene en la desintoxicación ambiental a través del bloqueo de productos tóxicos que de otra manera se incorporarían a la cadena trófica (Porta *et al.*, 1999).

Los suelos estudiados presentan conductividades eléctricas > 4.0 mS cm⁻¹ a 25°C, con un PSI <15 y en general el pH es menor de 8.5. Estos suelos corresponden al tipo descrito por Hilgard (1906) como "alcali blanco" y a los "Solonchaks de los autores rusos (Aguilera, 1989). La cantidad de sales solubles controla la presión osmótica de la solución del suelo. El Na⁺ rara vez representa más de la mitad del total de cationes solubles y por lo tanto, no es adsorbido en forma importante (Richards, 1985). También los suelos presentan conductividades <4.0 mS cm⁻¹ a 25°C con un PSI >15, el pH varía entre 8.5 y 10, dando origen a los suelos sódicos. La alta acumulación de Na⁺ intercambiable de los 4 sitios en las capas superficiales se debe al riego con agua con baja concentración de Ca²⁺ y con un contenido mayor de SO₄²⁻ y HCO₃⁻ de Na⁺ y de Mg²⁺. Mientras que los sitios de intercambio en su mayoría se guarda una relación cercana 1:1 del Ca²⁺ con respecto al Mg²⁺, siendo el contenido de Na⁺ en el interior del perfil el 3º catión en la proporción de los sitios de intercambio que ocupa, todo lo anterior tiende a favorecer la dispersión de los coloides.

En la Figura 7.15 se muestra la relación entre los sólidos totales (mg L⁻¹) y la conductividad eléctrica (CE) obtenida en los 134 muestras de suelos de los 4 sitios estudiados. En los valores que se presentan se observa que mg L⁻¹ = 676.03CE. Es muy importante conocer el coeficiente (K=676.03) que relaciona la concentración total de sólidos disueltos (mg L⁻¹) y la conductividad eléctrica (CE), ya que cuando se realizan numerosas determinaciones del parámetro de conductividad es necesario conocer la totalidad de sólidos solubles TSS; por tal motivo fue necesario multiplicar los valores de conductividad eléctrica (CE) por el coeficiente K.

En las Figuras 7.16 y 7.17 se muestran las relaciones entre los cationes y aniones solubles ($\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$) y la conductividad eléctrica en (mS cm^{-1}) respectivamente.

El coeficiente para cationes es $K=10.583$ y el coeficiente para aniones es $K=10.588$.

Durante la época de sequía las sales afloran a la superficie del suelo y forman costras blancas fáciles de observar. Aunque los suelos están floculados por el exceso de sales, se forman estructuras prismáticas y columnares de consistencia muy dura a donde se manifiesta el efecto de las concentraciones de Na^+ y Mg^{2+}

La cantidad de agua que proviene de la lluvia (mayor de 500 mm y menor de 1 740 mm) a veces es insuficiente para restituir la cantidad de agua que se perdió por evaporación y evapotranspiración (Aceves, 1979).

De acuerdo al Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, estos suelos se clasifican como salino-sódicos, y salinos en el sitio 1; en el sitio 2, el P-4 es salino-sódico en todo el perfil y en el P-5 sin problemas de salinidad y sodicidad a partir de los 80 cm de profundidad. En el sitio 3, el P-6 es salino sódico de 0 a 70 cm y salino de 70 a 110 cm de profundidad; el P-7 es salino-sódico de 0 a 50 cm y sódico de 50 a 100 cm; y el P-8 no tiene problemas de salinidad y sodicidad a partir de los 60 cm. En el sitio 4, el P-9 es salino-sódico de 0 a 20 cm de profundidad y normal de 20 a 90 cm; y finalmente en el P-10 es salino-sódico de 0 a 140 cm.

En los 4 sitios estudiados, los cationes solubles dominantes son: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$.

En la Figura 7.18. se muestra la distribución de los tipos de sales de los 4 sitios estudiados, en donde se observa la siguiente secuencia: $\text{MgSO}_4 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaHCO}_3 > \text{CaSO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4$; y en menor concentración: se presentan las sales $\text{Mg}(\text{HCO}_3)$, MgCl_2 y CaCl_2 .

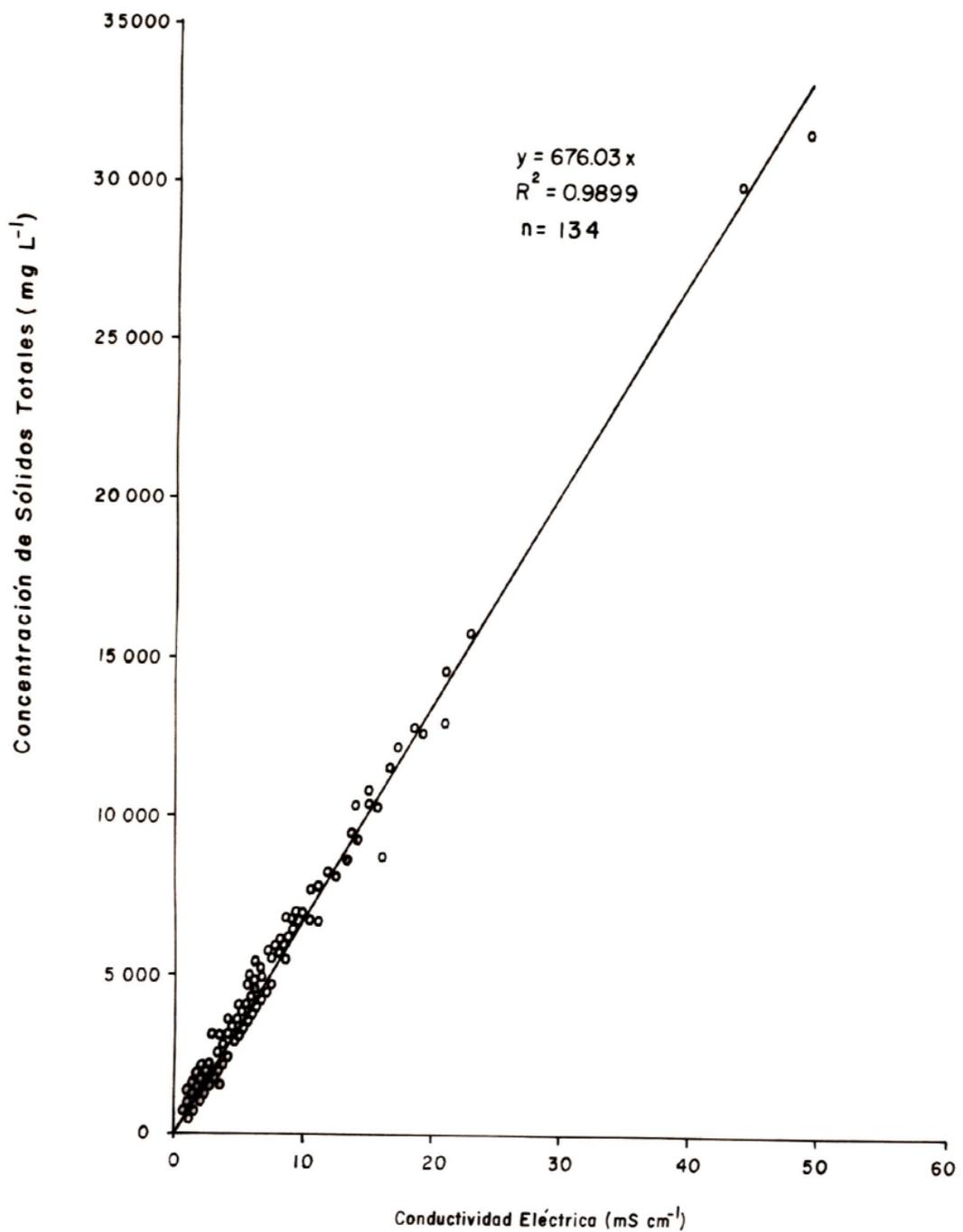


Figura 7.15. Relación de Conductividad Eléctrica y Concentración de Sólidos Totales en los perfiles de Suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxiátemalco, Tláhuac y Mixquic, D. F.

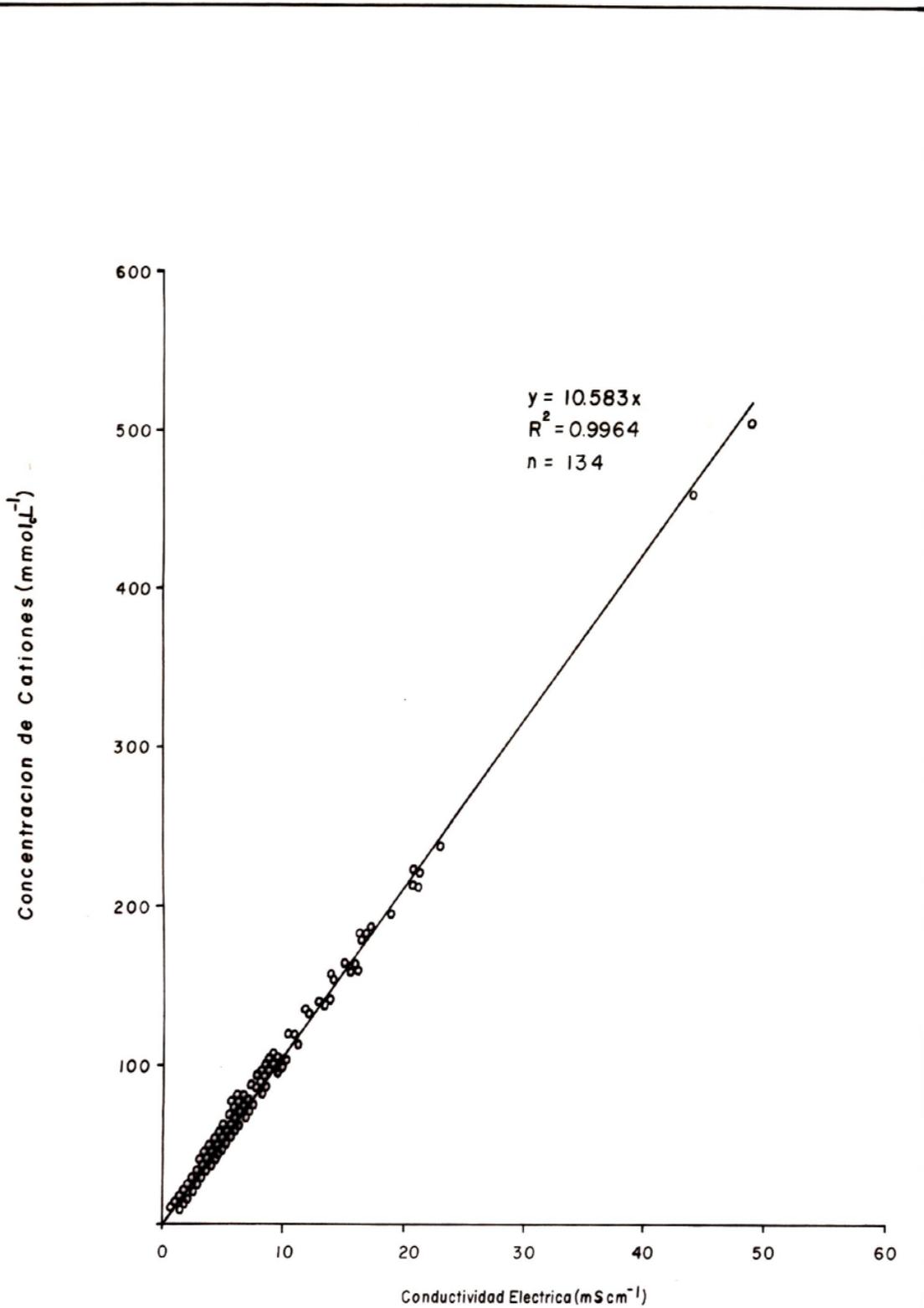


Figura 7.16. Relación de Conductividad Eléctrica y Concentración de Cationes de los perfiles de los Suelos de chinampa de Xochimilco, San Luis Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.

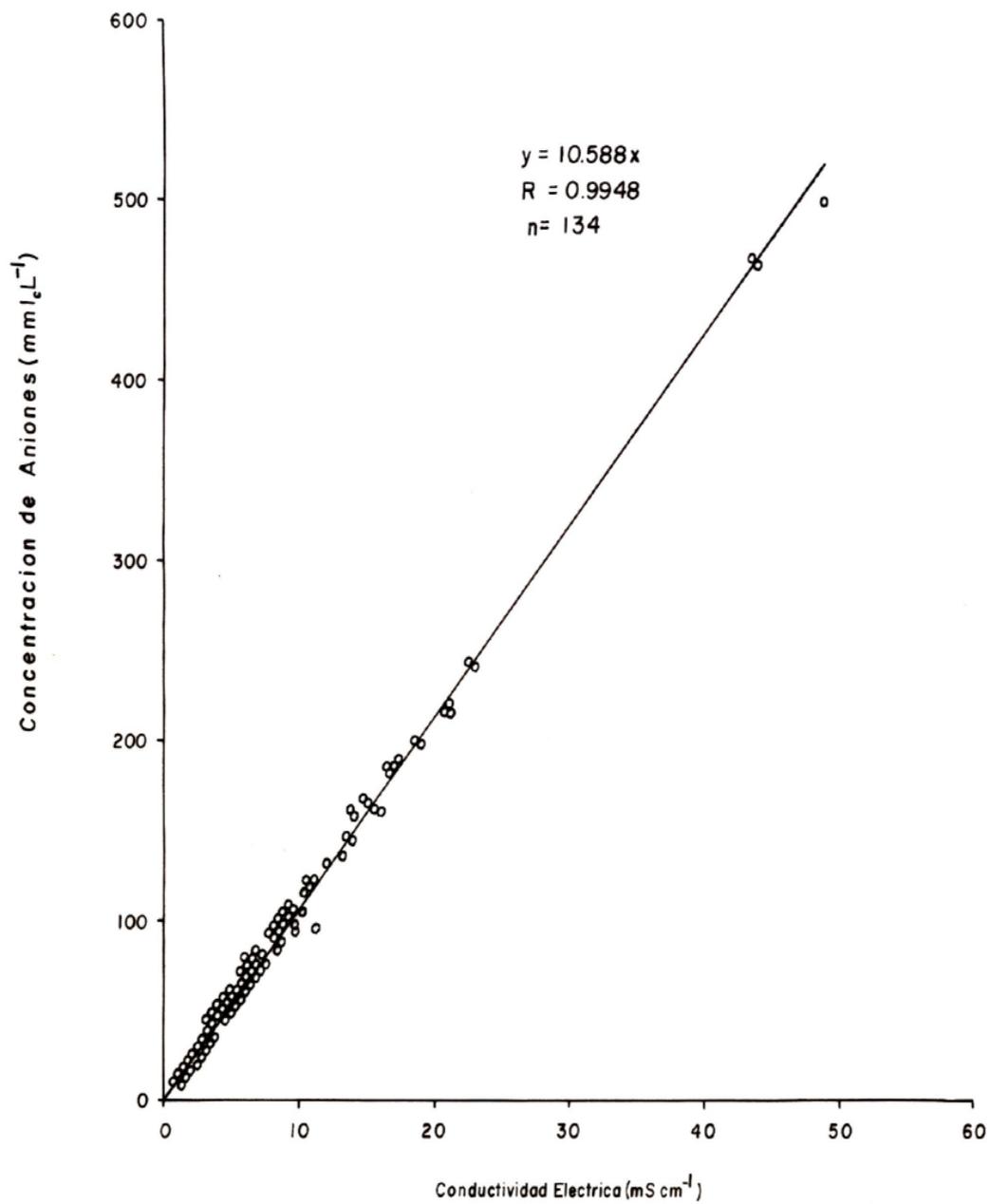
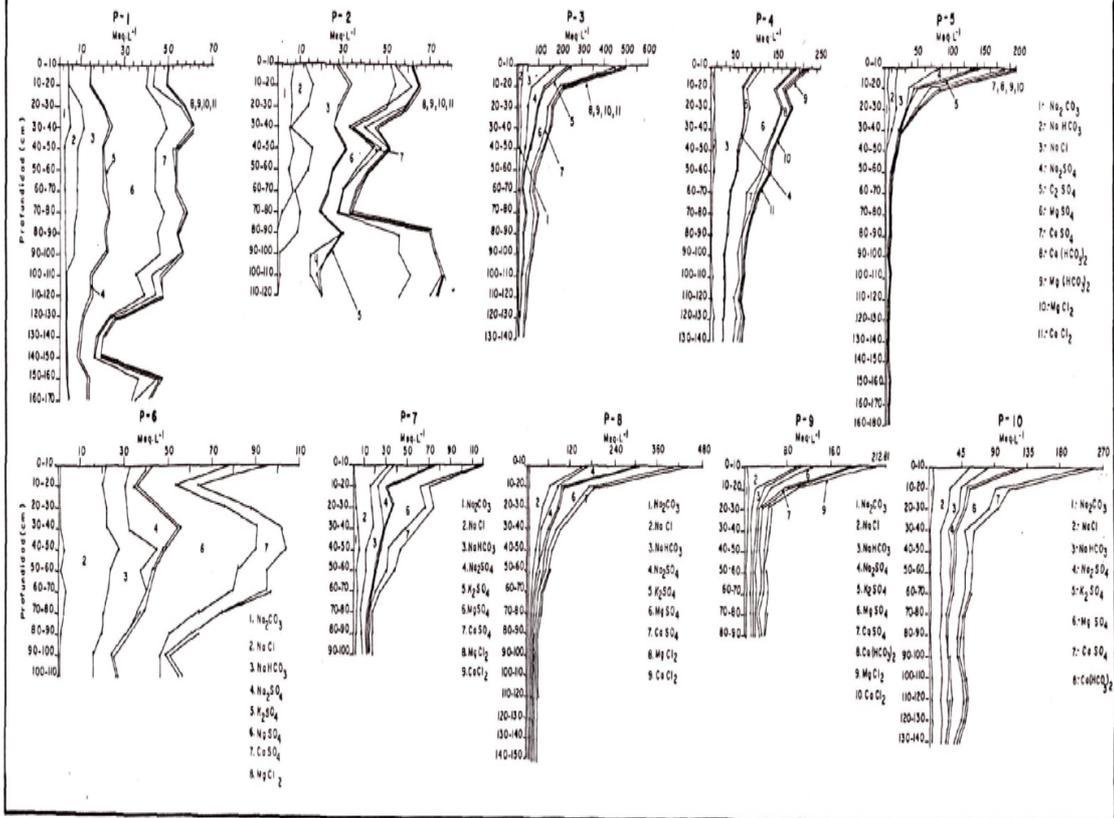
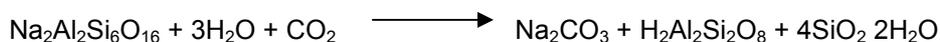


Figura 7.17. Relación de Conductividad Eléctrica y Concentración de Aniones en los perfiles de los Suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxiátemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.

Figura 7.18 Distribución de los Tipos de sales de los suelos de chinampa de Xochimilco, San Luis Tlaxialtamalco, Tláhuac y Mixquic D.F.



El ion Na⁺ se encuentra en minerales como la Albita NaAl₂Si₃O₈, plagioclasa, nefelino y en los minerales que contienen Cl como sodolita. El intemperismo de los aluminosilicatos que contienen sodio se presenta de la siguiente forma:



Las sales de Na₂CO₃ y NaHCO₃ que se han formado reaccionan con los ácidos y sales formando NaCl, Na₂SO₄, NaNO₃ y Na₂SiO₃ (Kovda *et al.*, 1967; Bohn *et al.*, 1993). Cuando las concentraciones son muy altas en la composición de sales predominan el NaCl y Na₂SO₄ y generalmente se acumulan en los suelos sódicos y salinos (Szabolcs, 1989; Bingham *et al.*, 1979). Además una fracción del Na⁺ adsorbido puede pasar a la solución del suelo donde reacciona con el CO₃²⁻ y HCO₃⁻ para formar Na₂CO₃ y NaHCO₃. Los suelos salinos contienen hasta 2.0-3.0% de sales de sodio, las costras salinas pueden contener de 10-20%. Los siguientes minerales de sodio son los más ampliamente distribuidos y se precipitan durante la evaporación de las aguas de los suelos con niveles freáticos superficiales: halita (NaCl), mirabilita (Na₂SO₄ · 10H₂O), salitre sódico (NaNO₃), termonatrita (Na₂CO₃ · H₂O), soda (Na₂CO₃ · 10H₂O), trona (Na₂CO₃NaHCO₃ · 2H₂O), glauberita (2Na₂SO₄Na₂CO₃) y gaylusita (CaCO₃Na₂CO₃ · 5H₂O) (Antipov-Karataev, 1967; Szabolcs, 1989 citado en Cíntora y Ortega, 2005).

Los altos contenidos de Na⁺ en las soluciones de los suelos origina que se formen las costras, los encharcamientos y una baja permeabilidad. Además en estos suelos el Na⁺ soluble aumenta el hinchamiento de las arcillas y la dispersión originando que disminuya la permeabilidad del agua y del aire.

El Mg²⁺ es el 2º catión más abundante en los suelos estudiados. Es un constituyente importante de muchos minerales aluminosilicatos primarios y secundarios (con excepción de los feldespatos). Con frecuencia, el Mg²⁺ de los minerales máficos (ricos en Mg²⁺ y Fe²⁺), conduce a la formación de cloritas y montmorillonitas (Bohn *et al.*, 1993).

La dolomita CaMg(CO₃)₂ se encuentra en materiales esqueléticos en invertebrados marinos y materiales sedimentarios marinos (Mackensie *et al.*, 1983 citado en Dixon y Weed, 1989). También se presenta en suelos como mineral secundario.

Las formas minerales de CaMg(CO₃)₂ se presentan en forma natural. El Mg²⁺ tiene una fuerte tendencia a formar minerales de carbonato hidratado como hidromagnesita [Mg₅(CO₃)₄(OH)₂ · 4H₂O ó 3MgCO₃ · Mg(OH)₂ · 3H₂O], artinita [Mg₂CO₃(OH)₂ · 3H₂O], lansfordita (MgCO₃ · 5H₂O) y nesquehonita (MgCO₃ · 3H₂O). Bajo condiciones ambientales extremas de alto Mg y CO₃ puede ser posible por las formas de MgCO₃ en los suelos.

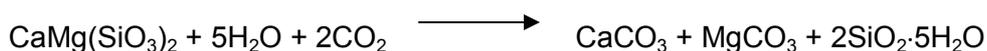
Durante el intemperismo de los silicatos magnésicos se forma MgCO₃:



Durante el intemperismo de los feldespatos, en condiciones de una reacción alcalina se forma montmorillonita, hidromicas y otros minerales arcillosos. Las sales $MgSO_4$ y $MgCl_2$ son muy solubles en agua, el $Mg(HCO_3)_2$ es menos soluble. Las sales de magnesio que se solubilizan en las aguas superficiales y freáticas participan en los grandes ciclos de migración de la corteza terrestre (Huez, 1985 citado por Cíntora y Ortega, 2005). En las rocas sedimentarias y en los suelos, el Mg se acumula en forma de minerales salinos: magnesita $MgCO_3 \cdot H_2O$, dolomita $CaMg(CO_3)_2$, epsomita $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, kieserita $MgSO_4 \cdot H_2O$, astrakanita $Na_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 4H_2O$, carnalita $KClMgCl_2 \cdot 6H_2O$, kainita $KClMgSO_4 \cdot 3H_2O$ (Kovda *et al.*, 1967).

El Ca^{2+} es el 3º catión presente en éstos suelos; El Ca^{2+} es un nutriente esencial y sólo en raras ocasiones los suelos estudiados tienen deficiencias de este ión. Es uno de los elementos ampliamente difundidos durante la cristalización del magma. El contenido de Ca^{2+} en los basaltos alcanza un 6.40% y en los granitos disminuye hasta 1.55%. El Ca^{2+} se encuentra en la composición de las piroxenas como la Augita $Ca(Mg,Fe,Al)(Al,Si)_2O_6$, anfíboles como la tremolita $Ca_2Mg_5(OH,F)_2(Si_4O_{11})_2$, o la hornblenda $Ca_2(Mg,Fe)_5(OH)_2(Al,Si)_8O_{22}$, y plagioclasas como la anortita $Ca_2Al_2Si_2O_8$ (Kovda *et al.*, 1967; Bohn *et al.*, 1993).

En el área de estudio el intemperismo de los silicatos de calcio se presenta de la siguiente manera:



El intemperismo de los aluminosilicatos que contienen calcio se presenta de acuerdo con la siguiente reacción:



El $CaCO_3$ que se ha formado durante el intemperismo de los minerales que contienen Ca^{2+} , en presencia de CO_2 , pasa a una forma más soluble como el $Ca(HCO_3)_2$.

Las sales solubles de Ca^{2+} como: $Ca(HCO_3)_2$, $CaCl_2$ y $Ca(NO_3)_2$, se acumulan en las aguas naturales: superficiales, freáticas y con el flujo de éstas ingresan a las depresiones internas, mares y océanos. Una parte del Ca^{2+} , como resultado de la evaporación de las reacciones de intercambio se precipita formando: calcita ($CaCO_3$), yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), anhidrita ($CaSO_4$), gaylusita ($CaCO_3 \cdot Na_2CO_3 \cdot 5H_2O$) y dolomita $CaMg(CO_3)_2$ (Kovda *et al.*, 1967).

Como se puede observar en los 4 sitios, el K^+ se encuentra en menor concentración, debido a que hay una resistencia muy notable al intemperismo de los minerales potásicos.

El K^+ se encuentra en la composición de las rocas ácidas y básicas. En las rocas básicas y alcalinas el contenido de este elemento es menor si se compara con el contenido de Na^+ . En los basaltos su contenido es de 1.26%.

El K⁺ está en la composición de la ortoclasa y microclina (KAlSi₃O₈), muscovita [K(Mg,Fe)₃(OH,F)₂AlSi₃O₁₀] y como trazas se encuentra en las plagioclasas.

En los procesos de intemperismo de los aluminosilicatos que contienen potasio las reacciones ocurren de la siguiente manera:



El K₂CO₃ cuando interactúa con los ácidos y con las sales se transforma en cloruros, sulfatos y nitratos. Las sales minerales del K⁺ son: silvita (KCl), carnalita (KClMgCl₂·6H₂O), kainita (KClMgSO₄·4H₂O) y salitre potásico (KNO₃).

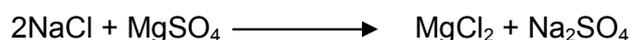
En los 4 sitios los aniones solubles tuvieron el siguiente orden de abundancia: SO₄²⁻>Cl⁻>HCO₃⁻>CO₃²⁻.

Los SO₄²⁻ provienen del intemperismo de minerales volcánicos y sedimentarios. Las sales de este grupo son el CaSO₄ liberado de minerales que lo contienen, también se forma por la reacción de Na₂SO₄ y CaCl₂. En altas concentraciones forma un sistema salino junto con el carbonato de calcio (CaCO₃) que al reaccionar con el NaCl produce el Na₂SO₄, ésta sal al hidratarse provoca que aún y cuando exista un alto contenido de humedad en el suelo, el agua no sea disponible para las plantas (Kovda *et al.*, 1967).

Sus sales minerales son: yeso (CaSO₄·2H₂O), anhidrita (CaSO₄), kiserita (MgSO₄), mirabilita (Na₂SO₄·10H₂O), glauberita (Na₂SO₄CaSO₄), astrakanita (Na₂SO₄MgSO₄·4H₂O) y kainita (KClMgSO₄·4H₂O).

El Cl⁻ en esta región está asociado con el F, con minerales micaceos, apatita, hornblenda y algunos feldespatos. El Cl⁻ es muy móvil durante los procesos hidrotermales e hipergénicos. Bajo condiciones específicas, los cloruros están asociados con algunos metales formando minerales como AgCl, PbCl₂, Cu₂(OH)₃ (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

Los cloruros son sales muy solubles y con una toxicidad alta. El NaCl es la sal más frecuente en suelos salinos. Es probable que en los suelos estudiados haya una cantidad considerable de MgCl₂, por presentar una salinidad extremadamente alta. Se puede formar si el suelo recibe aguas ricas en iones Cl⁻ y Na⁺, presentando la siguiente reacción:



El MgCl₂ es una sal altamente tóxica, y perjudicial para las plantas (Kovda *et al.*, 1967; Porta *et al.*, 1999). Los minerales del Cl⁻ son: halita NaCl, silvita KCl, epsomita MgSO₄·7H₂O, carnalita KClMgCl₂·6H₂O, kainita KClMgSO₄·4H₂O y Bichofita MgCl₂·6H₂O.

El origen de los carbonatos en la zona de estudio se debe a los depósitos lacustres.

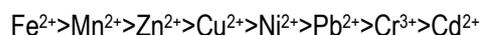
La aragonita CaCO₃ esta comúnmente asociada con depósitos sedimentarios del Holoceno o Pleistoceno, conchas, o material esquelético.

También las plantas reciclan el Ca^{2+} a la superficie. Los carbonatos son regularmente transportados a cierta distancia, suspendidos en el aire y luego son depositados sobre la superficie como ceniza o en la lluvia. Los iones Ca^{2+} entran al suelo por el agua de lluvia y se combinan con el HCO_3^- asociado con CO_2 unido con el H_2O (Harvey y Warren, 1989 citado por Dixon, 1989).

7.2. METALES TRAZA Y METALES PESADOS EXTRACTABLES (DTPA) EN SUELOS DE CHINAMPAS.

Los resultados de los contenidos de metales traza y metales pesados extractables (DTPA) en los suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Míxquic, D.F., se muestran en el Cuadro 7.21.

El orden de concentración de los metales traza y metales pesados en los 10 perfiles es el siguiente:



7.2.1. Xochimilco

La matriz de correlaciones de Pearson se muestra en el Apéndice A, Cuadro A11.

Las concentraciones de Fe, Cu, Mn, y Zn disponibles con DTPA se encuentran dentro del intervalo considerado como adecuados según el criterio de Viets y Lindsay (1973). Ver Apéndice D, Cuadro D1.

El contenido de Fe^{2+} es más alto en el P-1 con valores que fluctúan de 187.48 a 178.65 mg kg^{-1} en la capa de 0 a 30 cm; mientras que en el P-2, estos valores fluctúan de 94.40 a 77.18 mg kg^{-1} en la misma profundidad. Dichos valores muestran un incremento en los primeros 30 cm.

El Fe tuvo una asociación positiva con el Cu^{2+} , Zn^{2+} y Cd^{2+} ; con el % limo, MO; CIC y Mg^{2+} intercambiable; y con el % arcilla hay una correlación negativa. Esta correlación positiva con la MO y CIC demuestra que la MO forma complejos seudosolubles que impiden su precipitación en un pH ligeramente ácido ó ácido principalmente en las capas más profundas. Mientras que con el contenido de arcilla el Fe^{2+} no forma complejos estables (Seoáñez *et al.*, 1999). Esto mismo se puede observar con el Cu^{2+} , Zn^{2+} , y Cd^{2+} .

El Cu^{2+} es más alto en el P-1 que en el P-2 con valores que fluctúan de 5.68 a 4.28 mg kg^{-1} en la capa de 0 a 30 cm; por lo que hay una asociación positiva con el Zn^{2+} ; Cd^{2+} ; % limo; MO; CIC; Mg^{2+} y K^+ intercambiable; y una asociación negativa con el % arcilla.

El Mn^{2+} es más alto en el P-2 con valores de 15.5 a 16.42 mg kg^{-1} ; existiendo una asociación negativa con el pH en KCl 1:10; CIC; Mg^{2+} y Na^+ . Esta correlación negativa significa que al aumentar el pH el Mn^{2+} no es fácilmente disponible. Lo mismo se puede ver con el Ni^{2+} .

El Zn^{2+} es más alto en el P-1 con valores de 11.86 y 13.28 mg kg^{-1} de 0 a 30 cm de profundidad. El Zn^{2+} tiene asociación positiva con Cd^{2+} ; % limo; MO; CIC y K^+ intercambiable; y una asociación negativa con el % arcilla.

El Pb^{2+} es más alto en el P-2 con una concentración de 3.08 mg kg^{-1} de 0 a 10 cm; con la profundidad si hubo una asociación negativa.

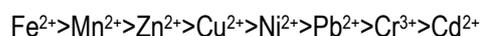
El Ni^{2+} es más alto en el P-1 de 0 a 10 cm con un valor de 2.46 mg kg^{-1} y una asociación negativa con el pH en H_2O 1:5 y 1:10; pH en KCl 1:5 y 1:10.

El Cr^{3+} es más alto en el P-1 con valores de 0.44, 0.08, y 0.12 mg kg^{-1} ; y una asociación positiva con el K^+ intercambiable.

El Cd^{2+} es más alto en el P-1 con valores de 0.10 y 0.12 mg kg^{-1} de 0 a 30 cm de profundidad; el coeficiente de correlación tuvo una asociación positiva con el Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , % limo; MO; CIC; y Mg^{2+} ; y una asociación negativa con el % arcilla.

Todas estas correlaciones positivas que se tienen se atribuyen a los altos contenidos de MO, ya que conjuntamente se forman con los metales quelatos estables (Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Alloway, 1992).

El orden de concentración de los metales traza y metales pesados tuvo la siguiente secuencia:



7.2.2. San Luís Tlaxialtemalco

La matriz de correlaciones de Pearson se muestra en el Apéndice A, Cuadro A12.

Las concentraciones de Fe, Cu, Mn y Zn se encuentran dentro del intervalo considerado como adecuadas según el criterio de Viets y Lindsay, (1973); según se observa en el Apéndice D, Cuadro D1.

El Fe^{2+} es más alto en el P-5 con valores de 84.84 a 109.36 mg kg^{-1} de 0 a 30 cm, por lo tanto el análisis de correlación en los 3 perfiles tuvo una asociación positiva con el Cu^{2+} y % arcilla; y una asociación negativa con el % de limo y pH en KCl 1:5 y 1:10 ; CIC y Ca^{2+} intercambiable. Ver Apéndice A, Cuadro A12.

Con relación a los suelos de Xochimilco, se enfatiza la participación de las arcillas en la retención de estos metales en el complejo de cambio.

Los contenidos más altos de Cu^{2+} se presentaron en el P-5 con valores de 6.24 a 6.40 mg kg^{-1} de 0 a 30 cm de profundidad, con una asociación positiva en los 3 perfiles con el % arcilla, y una asociación negativa con el % limo; pH con KCl 1:5 y 1:10; CIC y Ca^{2+} intercambiable.

El Mn^{2+} más alto se muestra en el P-4 con valores de 23.61 a 39.02 mg kg^{-1} de 0 a 30 cm; el análisis de correlación en los 3 perfiles tuvo una asociación positiva con el Zn^{2+} y Cd^{2+} ; % arena; MO; Mg^{2+} y K^+ intercambiables y una asociación negativa con el pH en H_2O 1:5 y 1:10 respectivamente.

Cuadro 7.21. Contenido de elementos traza y metales pesados extractables (DTPA) en suelos de chinampa

Sitio	Perfil No.	Profundidad cm	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
			mg kg ⁻¹							
Xochimilco	1	0-10	186.26	5.66	13.26	11.86	2.46	2.46	0.44	0.10
		10-20	187.48	5.68	13.72	13.28	2.64	2.64	0.08	0.12
		20-30	178.64	4.28	8.48	6.54	0.90	0.90	0.12	0.10
	2	0-10	91.76	2.02	15.58	5.18	3.08	1.98	0.04	0.08
		30-40	94.40	1.52	16.42	2.08	0.46	2.34	0.06	0.04
		40-50	77.18	1.44	15.84	0.42	0.64	2.10	0.06	0.04
	3	0-10	7.02	2.26	14.14	2.32	1.88	1.76	0.44	0.20
		10-20	10.67	3.61	11.08	2.32	1.60	1.40	0.16	0.12
		20-30	12.90	2.04	8.62	1.76	1.40	1.66	0.16	0.10
4	0-10	40.52	4.98	39.02	15.11	1.56	1.42	0.12	0.21	
	10-20	50.04	5.35	23.61	11.91	1.30	1.34	0.09	0.18	
	20-30	50.63	4.64	35.28	15.80	1.57	1.65	0.08	0.20	
S. L. Tlaxiátemalco	5	0-10	84.84	6.24	8.40	2.40	1.70	1.70	0.28	0.10
		10-20	100.38	6.40	6.48	1.88	1.18	1.56	0.24	0.08
		20-30	109.36	6.32	6.64	1.88	1.06	1.48	0.16	0.08
	6	0-10	17.50	3.68	12.38	1.18	2.08	1.64	0.16	0.06
		10-20	20.26	3.60	13.30	1.16	1.50	1.42	0.08	0.04
		20-30	22.06	3.84	13.68	0.98	1.48	1.86	0.08	0.04
	7	30-40	86.86	1.82	11.94	2.68	1.26	2.04	0.16	0.08
		40-50	46.22	1.56	10.72	2.20	0.76	1.94	0.12	0.04
		50-60	51.06	1.40	10.92	1.80	0.54	1.52	0.08	0.04
8	30-40	61.60	2.08	10.28	2.46	0.82	1.58	0.10	0.08	
	40-50	67.42	2.70	26.52	3.08	0.94	1.52	0.08	0.08	
	50-60	99.46	3.20	7.54	2.30	0.54	1.62	0.06	0.08	
9	0-10	25.82	5.32	51.26	9.46	2.09	0.86	0.12	0.17	
	10-20	58.32	6.56	62.68	11.31	2.19	1.08	0.07	0.14	
	20-30	43.22	6.49	39.90	6.90	1.68	0.95	0.09	0.10	
Míxquic	10	0-10	66.00	7.84	47.20	5.26	1.46	0.90	0.24	0.10
		10-20	112.76	5.68	37.44	3.18	0.90	0.76	0.16	0.08
		20-30	176.54	6.24	39.74	3.56	1.18	0.8	0.14	0.08

Los contenidos de Zn^{2+} más altos se encuentran en el P-4 con valores de 11.91 a 15.80 $mg\ kg^{-1}$; una asociación positiva en los 3 perfiles con el Cd^{2+} ; % arena; MO; y K^+ intercambiable y una asociación negativa con el pH en KCl 1:5 y 1:10.

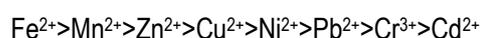
Los contenidos de Pb^{2+} son más altos en el P-3 en la capa de 0 a 30 cm con valores de 1.88 a 1.40 $mg\cdot kg^{-1}$, teniendo una asociación positiva con la CIC; Mg^{2+} y Na^+ intercambiable.

El Ni^{2+} es más alto en el P-3 con valores de 1.76 a 1.40 $mg\ kg^{-1}$.

El Cr^{3+} es más alto en el P-3 con valores de 0.44 y 0.16 $mg\ kg^{-1}$ de 0 a 30 cm. En los 3 perfiles el Cr^{3+} tiene una asociación positiva con el Na^+ intercambiable.

El Cd^{2+} es más alto en el P-4 con valores de 0.18 a 0.21 $mg\ kg^{-1}$. En los 3 perfiles el Cd^{2+} tiene asociación positiva con el Mn^{2+} y Zn^{2+} ; % arena; CIC; Mg^{2+} y K^+ intercambiables.

El orden de concentración de los metales traza y metales pesados tuvo la siguiente secuencia:



7.2.3. Tláhuac

La matriz de correlaciones de Pearson se muestra en el Apéndice A, Cuadro A13.

Las concentraciones de Fe, Cu, Mn, y Zn se encuentran dentro del intervalo considerado como adecuados según Viets y Lindsay, (1973). Ver Apéndice D, Cuadro D1.

Los contenidos de Fe^{2+} más altos se presentan en los P-7 y P-9, observándose una mayor acumulación de éste en las capas de 30 a 40 cm con un valor de 86.86 $mg\ kg^{-1}$ en el P-7 y de 61.60 $mg\ kg^{-1}$ en el P-8 hasta valores de 51.06 $mg\ kg^{-1}$ de 50 a 60 cm en el P-7 y de 99.46 $mg\ kg^{-1}$ en el P-8 a la misma profundidad. Mientras que en las capas superficiales (0 a 20 cm) los contenidos de Fe oscilan de 17.50 y 20.26 $mg\ kg^{-1}$ en el P-6.

Por lo tanto, tuvo una asociación positiva con la profundidad; Zn^{2+} y Cd^{2+} y una asociación negativa con el Pb^{2+} y % arena.

El Cu^{2+} es más alto en el P-6 de 0 a 30 cm con valores que fluctúan de 3.60 a 3.84 $mg\ kg^{-1}$; en comparación con las capas de 30 a 60 cm en el P-7 y P-8; observando que el coeficiente de correlación tuvo una asociación positiva con el % limo; MO; CIC; Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables.

El Mn^{2+} aparentemente es más alto en el P-6 con valores que fluctúan de 12.38 a 13.68 $mg\ kg^{-1}$ de 0 a 30 cm. Mientras que en el P-8 en la profundidad de 50 a 60 cm alcanza un valor de 7.54 $mg\ kg^{-1}$; no hubo ningún tipo de asociación.

El Zn^{2+} es más alto en el P-8 de 30 a 60 cm con valores que fluctúan de 3.08 a 2.30 $mg\ kg^{-1}$, mientras que en el P-6; los valores oscilan de 1.18 a 0.98 $mg\ kg^{-1}$ de 0 a 30 cm; el Zn^{2+} presenta una asociación positiva en los 3 perfiles con el Fe^{2+} ; Cd^{2+} y pH con KCl 1:10.

El Pb^{2+} es más alto en el P-6 con valores que fluctúan de 2.08 a 1.48 $mg\ kg^{-1}$ de 0 a 30 cm; mientras que en los perfiles P-7 y P-8 son más bajos con valores que fluctúan de 1.26 a 0.54 $mg\ kg^{-1}$ de 30 a 60 cm en el P-7; y de 0.94 a 0.54 $mg\ kg^{-1}$ de 30 a 60 cm en el P-8.

Hay una asociación positiva en los 3 perfiles con el % limo; MO; Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables y una asociación negativa con la profundidad; Fe^{2+} y % arcilla.

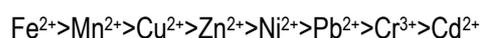
El Ni^{2+} es más alto en el P-7 de 30 a 60 cm con concentraciones que fluctúan de 2.04, 1.94 y 1.52 $mg\ kg^{-1}$ y los valores más bajos se presentan en el P-8 con valores de 1.58, 1.52 y 1.62 $mg\ kg^{-1}$. Con la correlación de Person no hubo ningún tipo de asociación.

Los contenidos de Cr^{3+} y Cr^{6+} fueron bajos en los perfiles P-6 y P-8; pues fluctúan de 0.16 y 0.08 $mg\ kg^{-1}$ de 0 a 30 cm en el P-6 y de 0.10, 0.08 y 0.06 $mg\ kg^{-1}$ de 30 a 60 cm en el P-9; mientras que en el P-7 los valores fluctúan de 0.16, 0.12 y 0.08 $mg\ kg^{-1}$.

Tampoco se obtuvo ninguna correlación en los 3 perfiles estudiados.

El Cd^{2+} es más alto en el P-8 con valores de 0.08 $mg\ kg^{-1}$ de 30 a 60 cm; y en el P-6 de 0.06 y 0.04 $mg\ kg^{-1}$ de 0 a 30 cm. El coeficiente de correlación para los 3 perfiles, indicó su asociación positiva con el Fe^{2+} y Zn^{2+} y Na^{+} intercambiable.

El orden de concentración de los metales traza y metales pesados tuvo la siguiente secuencia:



7.2.4. Míxquic

La matriz de correlaciones de Pearson se muestra en el Apéndice A, Cuadro A14.

Las concentraciones de Fe, Cu, Mn y Zn se encuentran dentro del intervalo considerado como adecuado (Viets y Lindsay, 1973). Ver Apéndice D, Cuadro D1.

El Fe^{2+} es más alto en el P-10 con valores que fluctúan de 66.00 a 176.54 $mg\ kg^{-1}$ de 0 a 30 cm; mientras que en el P-9 fluctúan de 25.82 a 58.32 $mg\ kg^{-1}$ a la misma profundidad, por lo tanto en los 2 perfiles se tiene una asociación negativa con el % limo y pH en H_2O 1:5.

El Cu^{2+} es más alto en el P-10 con un valor de 7.84 $mg\ kg^{-1}$, mientras que en el P-9 es de 5.32 $mg\ kg^{-1}$, no hubo correlación.

El Mn^{2+} es más alto en el P-9 de 0 a 30 cm, con valores de 62.68 a 39.90 $mg\ kg^{-1}$, mientras que en el P-10 van de 47.20 a 37.44 $mg\ kg^{-1}$; por lo que en ambos perfiles se presenta una asociación positiva con el Zn^{2+} y Pb^{2+} .

El Zn^{2+} es más alto en el P-9 con valores de 11.31 a 6.90 $mg\ kg^{-1}$ de 0 a 30 cm, mientras que en el P-10 fluctúan de 5.26 a 3.18 $mg\ kg^{-1}$, a la misma profundidad. En los 2 perfiles se presenta una asociación positiva con el Mn^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} y Cd^{2+} ; pH en H_2O 1:5 y 1:10 y K^{+} intercambiable.

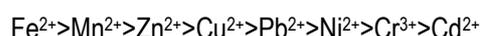
El Pb²⁺ es más alto en el P-9 con valores de 2.19 a 1.68 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm; mientras que en el P-10 fluctúan de 1.46 a 0.90 mg kg⁻¹ a la misma profundidad. El Pb²⁺ presenta una asociación positiva con el Mn²⁺, Zn²⁺ y Cd²⁺; con el pH en H₂O 1:5 y 1:10; y K⁺ intercambiable.

El Ni²⁺ es más alto en el P-9 con valores que fluctúan de 0.86 a 1.08 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad; mientras que en el P-10 fluctúan de 0.90 a 0.76 mg kg⁻¹ a la misma profundidad. Hubo una asociación positiva con el Zn.

El Cr³⁺ es más alto en el P-10 con valores de 0.24 a 0.14 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm y en el P-9 los valores fluctúan de 0.12 a 0.07 mg kg⁻¹ a la misma profundidad. El análisis de correlación en ambos perfiles, el Cr³⁺ presenta una asociación positiva con el pH en KCl 1:10, CIC y Na⁺ intercambiable; y una asociación negativa con el pH en H₂O 1:10.

Finalmente el Cd²⁺ es un poco más elevado en el P-9 con valores de 0.17 a 0.10 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm y en el P-10 con valores de 0.10 a 0.08 a la misma profundidad. Hubo una asociación positiva con el Zn²⁺, Pb²⁺ y K⁺ intercambiable.

El orden de concentración de los metales traza y metales pesados tuvo la siguiente secuencia:



Cuadro 7.22. Contenido de metales traza y metales pesados extractables en mg kg⁻¹ reportados por diferentes autores y sitios de muestreo

Elemento	Presente Estudio ^a DTPA	Mascareño (1974) ^b DTPA	Cajuste <i>et al.</i> , (1991) ^c DTPA	Carrillo <i>et al.</i> , (1991) ^d DTPA	Carrillo y Cajuste, (1992) ^e DTPA	Tamariz (1996) ^f DTPA	Vazquez, (1999) ^g EDTA-DTPA	Avilés (2000) ^h EDTA	Balderas (2001) ⁱ DTPA
Fe	51.82-135.95	1.58-6.81			0.40-26.00	57.50			57.66-101.00
Cu	2.65-6.36	0.88-11.96	60.67	2.00-18.00	0.20-14.50	21.52			1.03-2.99
Mn	13.03-52.61	0.10-13.20	155.33	8.00-24.00	0.50-5.00	16.13			26.33-48.00
Zn	1.98-6.61	0.02-0.12	173.00	3.00-26.00	0.02-7.50	20.07		114.40	7.43-8.85
Pb	1.10-1.70	1.00-7.00	100.00	2.00-12.00	0.50-13.00	18.12	8.50 2.20	46.33	2.02-2.65
Ni	0.89-2.07	Trazas-0.27	13.57	0.10-0.50	0.50-2.00	19.73	4.40 2.60		0.39-2.25
Cr	0.10-0.19	Trazas	75.66	0.20-0.40	0.10-1.50	1.34			
Cd	0.06-0.11	0.01-0.06	3.43	0.40-1.00	0.01-1.00	0.04	1.70 1.30	0.65	0.08-0.10

- Suelos de chinampa de Xochimilco, San Luis Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.
- DDR03, Valle del Mezquital, Edo. de Hidalgo.
- DDR03 en las localidades de Tlaminulpa, Atitalaquia y Tlahuelilpan en el Valle del Mezquital, Edo. de Hidalgo.
- El Jardín, Municipio del Progreso, Valle del Mezquital, Edo. de Hidalgo. Riego de 15 años con agua residual mezclada.
- DDR03, Valle del Mezquital, Edo. de Hidalgo.
- Suelos regados con aguas negras provenientes del río Atoyac y aguas municipales de la Ciudad de Atlixco, Puebla.
- En 17 sitios del DDR063 en los Municipios de Atitalaquia, Mixquiahuala, Tepatepec y Actopan en suelos regados de 5 a 84 años con aguas residuales.
- DDR063, en los Municipios de Atitalaquia, Tlaxcoapan, Xochitlán, Col. Bocamiño, Cerro Xicuco, Edo. de Hidalgo.
- En 5 sitios de los Municipios de Toluca y Jilotepec, Edo. de México.

Como se puede observar en el Cuadro 7.22., los valores de Fe reportados en este trabajo son más altos que los reportados por Mascareño, (1974) así como los de Carrillo y Cajuste, (1992); sin embargo son similares a los reportados por Tamaríz, (1996) y Balderas, (2001). Los valores de Cu^{2+} reportados por Mascareño, (1974) son dos veces mayores; los valores de Cajuste *et al.*, (1991) son diez veces mas altos; mientras que los reportados por Balderas, (2001) se encuentran dentro del rango reportados en éste trabajo.

Los resultados de Mn, reportados por Cajuste, *et al.*, (1991) son 3 veces más altos; mientras que Carrillo y Cajuste (1992), reportan valores más bajos. Los resultados obtenidos por Balderas, (2001), son similares a los reportados en el presente estudio. Los valores de Zn^{2+} mas bajos son los reportados por Mascareño en 1974; mientras que los valores reportados por Cajuste *et al.*, en 1991 son 25 veces mas altos y los de Aviles en el 2000 son 16 veces más altos.

Los valores de Pb reportados en este estudio son muy bajos, comparados con los resultados reportados por Cajuste *et al.*, (1991) que son 60 veces mas altos. Vázquez en 1999 y Balderas en ell 2001 reportan valores similares a los reportados en el presente trabajo. Los Valores de Ni reportados por Cajuste *et al.*, (1991) y Tamaríz en 1996 son 7 y 10 veces mas altos respectivamente, y son similares a los obtenidos por Carrillo y Cajuste *et al.*, (1992), Vazquez en 1999 y Balderas en el 2001.

Los valores de Cr obtenidos por Cajuste *et al.*, (1991) son 400 veces mas altos; sin embargo los resultados reportados por Carrillo *et al.*, (1991) son similares a los reportados en el presente trabajo.

Los valores de Cd reportados por Cajuste *et al.*, (1991) son 30 veces más altos. Los valores obtenidos en este estudio son similares con los de Balderas, (2001). Los valores mas bajos son los reportados por Mascareño, (1974).

7.3. METALES TRAZA Y METALES TOTALES (PIXE) EN SUELOS DE CHINAMPAS

Los resultados de los metales traza y metales pesados totales por el método del PIXE en los suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Míxquic, se muestran en el Cuadro 7.23.

El orden de concentración de metales traza y metales pesados en los 10 perfiles es el siguiente:

$\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cd}$

7.3.1. Xochimilco

La matriz de correlaciones de Pearson se muestra en el Apéndice A, Cuadro A15.

El contenido de Fe es más alto en el P-1 con valores de 20 744.60 a 17 917.60 mg kg^{-1} de 0 a 30 cm; y le sigue el P-2 con valores que van de 16 234.20 a 13 047.10 mg kg^{-1} de 0 a 30 cm de profundidad; el análisis de correlación mostró que el Fe en los 2 perfiles tiene una asociación positiva con el Cu, Zn, Ni, partículas de limo, MO, CIC, Mg^{2+} y K^{+} intercambiables y una asociación negativa con la arcilla respectivamente.

El contenido de Cu es más alto en el P-1 con valores que van de 35.60 a 97.30 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm; le sigue el P-2 con valores de 42.30, 0.00 y 10.90 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm; el análisis de correlación mostró que el Cu en ambos perfiles presenta una asociación positiva con el Fe, Zn y Ni.

El Mn es más alto en el P-1 con valores de 439.70, 246.20 y 268.70 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm; con una asociación positiva en ambos perfiles con el Cd y K⁺ intercambiable; no hay asociación negativa.

El contenido de Zn es más alto en el P-1 con valores de 109.60, 119.00 y 39.20 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm respectivamente; presentando una asociación positiva en ambos perfiles con el Fe, Cu y K intercambiable y una asociación negativa con la arcilla.

El contenido de Pb más alto fue en el P-2, con valores de 20.60, 140.70 mg kg⁻¹ de 0 a 10 y 30 a 40 cm de profundidad; mientras que en el P-1 las concentraciones fluctuaron de 60 a 70 y 22.40 mg kg⁻¹ de 0 a 10 y 10 a 20 cm de profundidad; no hubo correlación en ambos perfiles.

El contenido de Ni es más alto en el P-2 con valores de 86.60, 40.40 y 146.20 mg kg⁻¹ de 0 a 50 cm de profundidad; con una asociación positiva en ambos perfiles.

El contenido de Cr es más alto en el P-1 de 0 a 10 cm; con un valor de 69.20 mg kg⁻¹; mientras que en el P-2 es de 53.80 mg kg⁻¹ con una asociación negativa en ambos perfiles.

El Cd es más alto en el P-1 con valores de 1835.10 y 530 mg kg⁻¹ de 0 a 10 y 20 a 30 cm de profundidad, presentando una asociación positiva en ambos perfiles con el Mn²⁺ y K⁺ intercambiable.

El orden de concentración de los metales traza y metales pesados presentaron la siguiente secuencia:



7.3.2. San Luís Tlaxialtemalco

La matriz de correlaciones de Pearson se muestra en el Apéndice A, Cuadro A16.

El contenido de Fe es más alto en el P-4 con valores que fluctúan de 13 085.40, 23 135.00 y 19 702.40 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm; y los valores más bajos se encuentran en el P-5 con valores de 8 461.30, 7 362.80 y 7 771.90 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad; presentando una asociación positiva en los 3 perfiles con las partículas de arena y el K⁺ intercambiable.

El Cu es más alto en el P-4 con valores que fluctúan de 150.40, 44.80 y 15.00 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad y los valores más bajos se encuentran en el P-3 con valores de 38.10 y 18.80 mg kg⁻¹ de 0 a 10 y 20 a 30 cm respectivamente; en los 3 perfiles el análisis de correlación presenta una asociación positiva con el Zn.

El contenido de Mn es más alto en el P-5 con valores que fluctúan de 269.80, 558.50 y 332.30 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm; y los valores más bajos se encuentran en el P-3 con valores que oscilan de 220.00, 75.00 y 31.80 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad; en análisis de correlación en los 3 perfiles existe una asociación positiva con el Cr y las partículas de arcilla y una asociación negativa con las partículas de limo, pH en H₂O 1:10 y Ca²⁺ intercambiable.

El contenido de Zn es más alto en el P-4 con valores de 230.40, 96.90 y 73.90 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm; y las concentraciones más bajas se encuentran en el P-3 fluctuando de 41.90, 17.40 y 25.40 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad; el análisis de correlación presentó una asociación positiva con el Cu y MO.

El contenido de Pb es más alto en el P-4 con concentraciones de 46.70 y 91.30 mg kg⁻¹ de 0 a 20 cm de profundidad; los valores más bajos los encontramos en el P-3 con valores de 10.22 y 6.20 mg kg⁻¹ de 10 a 30 cm de profundidad; el análisis de correlación mostró una asociación positiva en los 3 perfiles con las partículas de arena.

El contenido de Ni es más alto en el P-5 con valores de 97.20, 95.10 y 70.28 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad.

El contenido de Cr es más alto en el P-4 y P-5 con valores de 89.10 mg kg⁻¹ y 89.76 mg kg⁻¹ de 0 a 10 cm de profundidad; los valores bajos se presentan en el P-3 con un valor de 76.70 mg kg⁻¹ en la misma profundidad. El análisis de correlación en los 3 perfiles tuvo una asociación positiva con el Mn²⁺ y % de arcilla y una asociación negativa con el pH en KCl 1:10.

El contenido más alto de Cd se encuentra en el P-5 con valores que fluctúan de 117.90, 611.30 y 245.10 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad y el P-4 con valores de 200.90, 429.80 y 248.80 mg kg⁻¹ a la misma profundidad.

El orden de concentración de los metales traza y metales pesados tuvo la siguiente secuencia:

Fe>Mn>Cd>Zn>Cr>Ni>Cu>Pb

Cuadro 7.23. Contenido de metales traza y metales pesados totales (PIXE) en los suelos de chinampa

Sitio	Perfil No.	Profundidad cm	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
			mg kg ⁻¹							
Xochimilco	1	0-10	20134.10	35.60	439.70	109.60	60.70	70.30	69.20	1835.10
		10-20	20744.60	97.30	246.20	119.00	22.40	96.90	36.60	650.23
		20-30	17817.60	39.80	268.70	39.20	7.10	62.30	10.30	530.00
	2	0-10	16234.20	42.30	165.50	60.80	20.60	86.60	53.80	90.30
		30-40	13997.30	27.20	179.30	22.65	140.70	40.40	40.60	80.27
		40-50	13047.10	10.90	196.50	18.00	56.20	146.20	35.20	50.60
	3	0-10	12849.30	38.10	220.00	41.90	17.36	70.76	76.70	89.78
		10-20	13404.10	35.56	75.00	17.40	10.22	53.15	60.36	70.25
		20-30	10900.80	18.80	31.80	25.40	6.20	40.20	44.30	40.20
San Luis Tlaxiatalmalco	4	0-10	13085.40	150.40	182.50	230.40	46.70	50.70	89.10	200.90
		10-20	23135.00	44.80	338.70	96.90	91.30	67.10	95.20	429.80
		20-30	19702.40	15.00	280.80	73.90	76.10	30.20	60.45	248.80
5	0-10	8461.30	41.70	269.80	59.70	20.10	97.20	89.76	117.90	
	10-20	7362.80	116.40	558.50	115.90	28.10	95.10	70.35	611.30	
	20-30	7771.90	77.00	332.30	56.30	15.26	70.28	66.20	245.10	
6	0-10	7040.10	25.40	440.50	64.80	44.77	80.20	97.20	327.90	
	10-20	6038.30	92.00	545.50	93.50	10.00	66.78	85.55	630.10	
	20-30	6010.20	87.20	397.30	86.10	56.60	44.20	60.76	147.27	
Tláhuac	7	30-40	3742.20	104.40	37.70	116.00	15.80	75.60	140.60	580.20
		40-50	3474.40	77.40	101.40	91.90	35.20	44.30	126.25	335.18
		50-60	7518.30	59.40	659.90	43.30	22.78	38.46	149.50	601.90
8	30-40	19054.40	54.60	167.70	41.80	95.30	44.60	87.25	417.20	
	40-50	22401.00	3.70	207.70	19.50	135.65	50.27	98.36	130.40	
	50-60	24022.70	61.90	249.80	80.00	80.27	36.20	66.32	96.20	
Míxquic	9	0-10	9106.80	66.70	703.00	81.10	85.65	80.20	160.22	420.80
		10-20	6202.50	116.40	295.00	77.50	98.72	60.70	85.43	90.30
		20-30	9149.30	48.40	600.80	105.50	76.15	44.86	60.20	239.60
10	0-10	8335.90	163.00	240.20	315.20	197.80	117.10	156.40	135.60	
	10-20	7116.30	68.60	589.60	82.90	22.00	97.20	92.30	580.70	
	20-30	8222.50	55.70	469.30	67.00	15.27	130.20	86.72	485.50	

7.3.3. Tláhuac

La matriz de correlaciones de Pearson se muestra en el Apéndice A, Cuadro A17.

El contenido de Fe más alto se encuentra en el P-8 con valores que fluctúan de 19 054.40, 22 401.00 y 24 022.70 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm; y los valores más bajos se presentaron en el P-7 con valores de 3 742.20, 3 474.40 y 7 518.30 mg kg⁻¹ a la misma profundidad. El análisis de correlación tuvo una asociación positiva con el pH en H₂O 1:10 y con el KCl 1:5 y 1:10; con una asociación negativa con las partículas de arena.

El contenido de Cu más alto se encuentra en el P-7 con valores de 104.40, 77.40 y 59.40 mg kg⁻¹ de 30 a 60 cm de profundidad, le sigue el P-6 con valores que van de 25.40, 92.00 y 87.20 mg kg⁻¹; y el P-8 con valores que fluctúan de 54.60, 3.70 y 61.90 mg kg⁻¹. El análisis de correlación en los 3 perfiles mostró una asociación positiva con el Zn.

El Mn más alto obtenido fue en el P-6 con valores de 440.50, 545.50 y 397.30 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad; las concentraciones más bajas se obtuvieron en el P-7 con valores que fluctúan de 37.70 y 101.40 mg kg⁻¹ de 30 a 40 y 40 a 50 cm respectivamente; el análisis de correlación mostró una asociación positiva con el Cr y una asociación negativa con el Ni.

El contenido de Zn más alto obtenido es en el P-7 con valores que fluctúan de 116.00, 91.90 y 43.30 mg kg⁻¹ de 30 a 60 cm de profundidad; los valores más bajos obtenidos se presentaron en el P-8 con valores de 41.80 y 19.50 mg kg⁻¹ de 30 a 40 y 40 a 50 cm de profundidad respectivamente; el análisis de correlación en los 3 perfiles mostró una asociación positiva con el Cu, Pb y Ni y una asociación negativa con el pH en H₂O 1:5 y 1:10.

El contenido de Pb es de 15.80 mg kg⁻¹ de 30 a 40 cm de profundidad en el P-7 y de 95.30 mg kg⁻¹ en los P-8; observándose que las más altas concentraciones se presentan de 40 a 60 cm con valores de 135.65 y 80.27 mg kg⁻¹ en el P-8. El análisis de correlación en los 3 perfiles tuvo una asociación positiva con el Zn.

El contenido de Ni es más alto en el P-7 con valores que fluctúan de 75.60 y 44.30 mg kg⁻¹ de 30 a 50 cm; y en el P-6 con valores que oscilan de 80.20 mg kg⁻¹ de 0 a 10 cm; y de 66.78 a 44.20 mg kg⁻¹ de 10 a 30 cm de profundidad. el análisis de correlación en los 3 perfiles tuvo una asociación positiva con el Zn y una asociación negativa con el Mn.

El contenido de Cr fue mayor en el P-7 con valores de 140.60 y 149.50 mg kg⁻¹ de 30 a 40 cm y 50 a 60 cm de profundidad; en el P-6 se presentaron las concentraciones más bajas con valores de 85.55 y 60.76 mg kg⁻¹ de 10 a 30 cm de profundidad. El análisis de correlación en los 3 perfiles tuvo una asociación positiva con el Mn y las partículas de arena, y una correlación negativa con el pH en KCl 1:5 y 1:10.

El Cd es más alto en el P-7 con valores de 335.18 a 601.90 mg kg⁻¹ de 30 a 60 cm de profundidad; los valores más bajos se presentaron en el P-8 con concentración de 96.20 a 417.20 mg kg⁻¹ de 30 a 60 cm de profundidad.

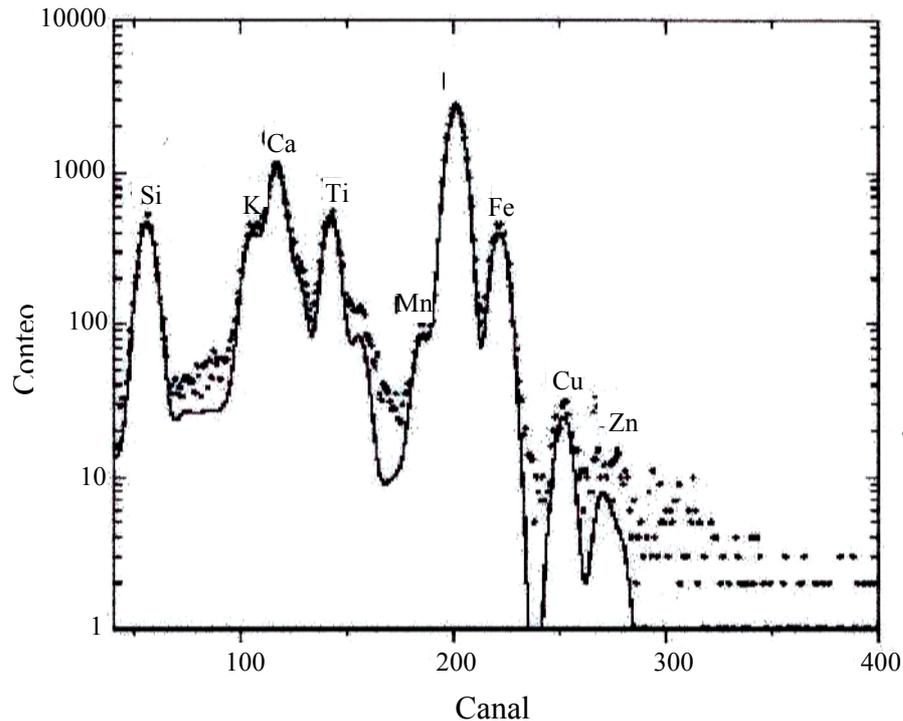
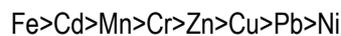


Figura 7.19. Espectro de emisión de rayos-X (PIXE) producido por el bombardeo de protones de 2 MeV a las muestras de suelo.

El orden de concentración de los metales traza y metales pesados tuvo la siguiente secuencia:



7.3.4. Mixquic

La matriz de correlaciones de Pearson se muestra en el Apéndice A, Cuadro A18.

El contenido de Fe es más alto en el P-9 con valores que fluctúan de 9 106.80, 6 202.50 y 9 149.30 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm; a diferencia del P-10 con valores que fluctúan de 8 335.90, 7 116.30 y 8 222.50 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad. No hubo correlación.

El Cu es más alto en el P-10 con valores que van de 163.00, 68.60 y 55.70 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad; y en el P-9 las concentraciones oscilan de 66.70, 116.40 y 48.40 mg kg⁻¹; el análisis de correlación en los 2 perfiles, el Cu presentó una asociación positiva con el Zn, Pb y Ni; y una asociación negativa con el Mn.

El Mn es más alto en el P-9 con valores que fluctúan de 703.00, 295.00 y 600.80 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad; mientras que en el P-10 los valores fluctúan de 240.20, 589.60 y 469.30 mg kg⁻¹ a la misma profundidad; el análisis de correlación en los 2 perfiles, el Mn presenta una asociación negativa con el Cu y Ni.

El contenido de Zn es mayor en el P-10 con valores que fluctúan de 315.20, 82.90 y 67.00 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad, mientras que en el P-9 los valores fluctúan de 81.10, 77.50 y 105.50 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad. El análisis de correlación en los 2 perfiles, el Zn presenta una asociación positiva con el Cu, Pb, Ni y Mg²⁺ intercambiable.

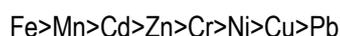
El contenido de Pb es mayor en el P-10 con valores de 197.80 y 22.00 mg kg⁻¹ de 0 a 20 cm de profundidad, mientras que en el P-9, los valores son de 85.65 y 98.72 mg kg⁻¹ a la misma profundidad, el análisis de correlación en ambos perfiles, el Pb tiene asociación positiva con el Cu, Zn, Ni, CIC, Mg²⁺ y Na⁺ intercambiables.

El contenido de Ni es mayor en el P-10 con un valor de 117.10 mg kg⁻¹ de 0 a 10 cm de profundidad y en el P-9 de 60.70 mg kg⁻¹ de 10 a 20 cm; el análisis de correlación en ambos perfiles del Ni tiene asociación positiva con el Cu, Zn, Pb y Mg intercambiable; y una asociación negativa con el Mn.

El contenido de Cr es mayor en el P-9 con un valor de 160.22 mg kg⁻¹; mientras que en el P-10 es de 156.40 mg kg⁻¹.

El contenido de Cd es mayor en el P-10 con valores que fluctúan de 135.60, 580.70 y 485.50 mg kg⁻¹ de 0 a 30 cm de profundidad; mientras que en el P-9 los valores fluctúan de 420.80, 90.30 y 239.60 mg kg⁻¹ a la misma profundidad.

El orden de concentración de los metales traza y metales totales tuvieron la siguiente secuencia:



Cuadro 7.24. Contenido de metales traza y metales pesados totales en mg kg⁻¹ reportados por diferentes autores y sitios de muestreo

Elemento	Presente Estudio ^a PIXE	Cajuste <i>et al.</i> , (1991) ^b HNO ₃ 4M	Carrillo <i>et al.</i> , (1991) ^c HNO ₃ 4M	Carrillo y Cajuste, (1992) ^d HNO ₃ 4M	Tamariz, (1996) ^e HNO ₃ 4M	Vazquez, (1999) ^f HNO ₃ 4M	Aviles, (2000) ^g HNO ₃ 4M	Balderas, (2001) ^h HNO ₃ 4M
Fe	8022.22-1699.82			5 300-10 014	844.00			12 128-19 985
Cu	42.18-86.47	44.33	17.00-70.00	7.00-60.00	59.86			13.60-22.55
Mn	249.32-482.98	382.67	189.00-485.00	260.00-486.00	181.30			234.00-356.00
Zn	61.54-121.53	75.33	32.00-133.00	11.00-286.00	112.40		153.84	52.57-68.10
Pb	34.59-82.59	128.33	58.00-242.00	3.00-93.00	50.86	4.00	57.86	17.07-23.45
Ni	53.40-88.38	18.77	1.80-4.00	18.00-54.00	61.14	20.80		8.73-12.60
Cr	40.95-106.87	54.00	36.00-94.00	6.00-69.00	19.90			11.35-12.00
Cd	228.23-539.42	1.40	1.50-3.00	0.50-7.00	0.14	3.90	0.79	0.43-1.23

- Suelos de chinampas de Xochimilco, San Luís Tlaxiátemalco, Tláhuac y Míxquic, D.F.
- DDR03 en las localidades de Tlaminulpa, Xochitlán y Arenal, en el Valle del Mezquital, Edo. de Hidalgo.
- El Jardín, Municipio del Progreso, Valle del mezquital Edo. de Hidalgo. Riego de 15 años con agua residual mezclada.
- DDR03, Valle del Mezquital, Edo. de Hidalgo.
- Suelos regados con aguas negras provenientes del río Atoyac y aguas municipales de la Cd. de Atlixco, Puebla.
- En 17 sitios del DDR063 en los Municipios de Atitalaquia, Mixquiahuala, tepatepec y Actopan en suelos regados de 5 a 84 años con aguas residuales.
- DDR063, en los Municipios de Atitalaquia, Tlaxcoapan, Xochitlán, Col. Bocamiño y Cerro Xicuco, Edo. de Hidalgo.
- En 5 sitios de los municipios de Toluca y Jilotepec, Edo. de México.

Con relación a los metales traza y metales pesados totales, se puede observar en el Cuadro 7.24. que las concentraciones de Fe, son muy semejantes a las obtenidas por Carrillo y Cajuste en 1992 y Balderas en el 2001. Tamariz en 1996 reporta un valor promedio 9.5 y 20 veces mas bajo con respecto al valor mínimo y máximo obtenido en el presente trabajo.

Balderas en el 2001 obtiene valores de Cu mas bajos; Cajuste *et al.*, (1991) reportan un valor promedio que está dentro del intervalo reportado en el presente trabajo. Los valores mínimos reportados por Carrillo *et al.*, (1991) y Carrillo y Cajuste, (1992) son inferiores a los obtenidos en éste estudio.

Los valores de Mn son similares a los obtenidos por Carrillo *et al.*, (1991); Carrillo y Cajuste (1992) y Balderas, (2000). Tamariz en 1996 reporta un valor promedio 1.4 veces más bajo con respecto al valor mínimo y 2.7 mas bajo con respecto al valor máximo obtenido. Carrillo *et al.*, (1991) y Carrillo y Cajuste en 1992, reportan valores de Zn inferiores a los valores mínimos obtenidos en el presente estudio; mientras que Cajuste *et al.*, en 1991 y Tamariz en 1996 presentan valores promedio que están dentro del intervalo obtenido. Carrillo *et al.*, (1991) reportan valores máximo 3 veces más altos de Pb con respecto a los obtenidos en el presente trabajo. Carrillo y Cajuste (1992) reportan valores mínimos 12 veces mas bajos que los reportados; y Vázquez en 1999 obtiene concentraciones 9 veces mas bajas con respecto a los valores máximos obtenidos en este trabajo.

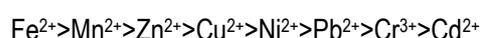
Carrillo *et al.*, (1991) obtienen valores mínimo de Ni 30 veces mas bajos y valores máximos 60 veces mas bajos que los obtenidos en el presente trabajo. Carrillo y Cajuste en 1992 reportan un valor mínimo 3 veces mas bajo; y Vázquez en 1999 reporta un valor promedio 2.5 veces mas bajo con respecto al presente trabajo.

Carrillo y Cajuste, en 1992 obtienen concentraciones mínimas y máximas de Cr 7 y 1.5 veces mas bajas respectivamente; Balderas en el 2001 reporta un valor mínimo 3.5 y un máximo 9 veces mas bajo con respecto al obtenido en el presente trabajo. Tamariz en 1996 obtiene un valor promedio 2 veces más bajo que el valor mínimo y 5 veces mas bajo que el valor máximo reportado en este trabajo.

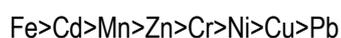
Carrillo *et al.*, (1991) obtienen un valor mínimo promedio de Cd 150 veces mas bajo y un valor máximo promedio 180 veces mas bajo que los valores mínimo y máximo obtenidos en este estudio. Tamariz en 1996; Aviles en el 2000 y Balderas en el 2001 obtienen concentraciones mas bajas.

7.3.5. Discusión de los metales traza y metales pesados extractables y totales en suelos de chinampa de Xochimilco, San Luís Tlaxialtemalco, Tláhuac y Mixquic, D.F.

El orden de concentración de metales extractables (DTPA) los 10 perfiles de suelos es el siguiente:



El orden de concentración de los metales totales (PIXE) en los 10 perfiles de suelos es el siguiente:



Con relación a las concentraciones de metales traza y metales pesados extractables en cada sitio de muestreo se tiene lo siguiente: Para Fe^{2+} el sitio 1>sitio 4>sitio 3>sitio 2; para Cu^{2+} y Mn^{2+} el sitio 4>sitio 2>sitio 1>sitio 3; para el Zn^{2+} el sitio 4>sitio 1>sitio 2>sitio 3; para el Pb^{2+} el sitio 1>sitio 4>sitio 2>sitio 3; para el Ni^{2+} : sitio 1>sitio 3>sitio 2>sitio 4; y finalmente para Cr^{3+} y Cd^{2+} el sitio 2>sitio 4>sitio 1>sitio 3.

Las concentraciones de metales traza y metales pesados totales (PIXE) en cada sitio de muestreo se tiene lo siguiente: para el Fe el sitio 1>sitio 2>sitio 3>sitio 4; para el Cu y Mn el sitio 4>sitio 3>sitio 2>sitio 1; para el Zn el sitio 4>sitio 2>sitio 3>sitio 1; para el Pb el sitio 4>sitio 3>sitio 1>sitio 2; para el Ni el sitio 4>sitio 1>sitio 2>sitio 3; para el Cr el sitio 4>sitio 3>sitio 2>sitio 1; para el Cd el sitio 1>sitio 3>sitio 4>sitio 2.

Las concentraciones más altas de Fe^{2+} extractable se presentaron en los perfiles P-1 del sitio 1; P-5 del sitio 2; P-8 del sitio 3 y P-10 del sitio 5.

Las concentraciones más altas de Fe total se presentaron en los perfiles P-1 del sitio 1, P-4 del sitio 2; P-8 del sitio 3 y P-9 del sitio 4.

Estos valores se deben probablemente a la presencia de minerales como Pirita (FeS_2), y a la Jarosita $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$. Las formas minerales y orgánicas de Fe son fácilmente transformadas en el suelo, además la materia orgánica tiene una influencia altamente significativa en la formación de óxidos de Fe. El Fe en rocas sedimentarias se presenta generalmente de hidrosilicatos como la glauconita y la chamosita. También se presenta como un constituyente menor de algunos minerales arcillosos como la montmorillonita y vermiculita (Flores, 1987).

El Fe es uno de los mayores constituyentes de la litósfera, y ocupa el 5% de las series máficas de las rocas magmáticas. Su abundancia global es de aproximadamente 45%. En estos suelos donde el pH es fuertemente alcalino, el Fe^{2+} precipita fácilmente como Sulfuro Ferroso (FeS). Este compuesto es amorfo y metaestable que cambia rápidamente a un material micro-cristalino llamado macrinawita (FeS) y greigita (Fe_3S_4), (Morvedt *et al.*, 1983). En soluciones que contengan Fe^{2+} y HCO_3^- se precipita la siderita (FeCO_3).

En estos suelos tanto las partículas de arcilla y limo influyen considerablemente en el alto contenido de Fe, esto se explica por el incremento del área específica y a las propiedades superficiales propias de los minerales tanto de arcilla como de limo.

En la fase líquida del suelo el Fe se encuentra en las formas más o menos solubles o fácilmente móviles. Las formas movilizables son las formas de intercambio y complejada por la materia orgánica soluble y con frecuencia son en forma ferrosas.

En general lo que gobierna la movilización y fijación de Fe es la oxidación y las condiciones alcalinas promueven la precipitación del Fe (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

La absorción de Fe por las raíces se incrementa al aumentar la concentración de Mn en las partículas de arcilla y limo (Mortvedt *et al.*, 1983).

Las concentraciones más altas de Mn^{2+} extractable se presentaron en los perfiles P-2, P-4, P-8 y P-9.

Las concentraciones más altas de Mn total se presentaron en los perfiles P-1, P-5, P-6 y P-9.

Las concentraciones de metales totales en los 4 sitios están dentro de los rangos reportados por Allaway (1968) y Bowen (1979). Ver Apéndice D, Cuadro D2.

El Mn está presente en las rocas ígneas principalmente en los minerales de silicatos. Este metal se encuentra en los minerales en forma de óxidos, CO_3^{2-} y silicato; siendo más abundante en basaltos que en granitos. Una de las similitudes del Mn y del Fe es el tamaño muy parecido del radio iónico de ambos. En las rocas sedimentarias el Mn es más abundante en las calizas y dolomitas que en esquistos. El Mn así como el Fe existen en el suelo en muchas formas, la mayoría de ellas más o menos oxidadas, siendo más solubles y más asimilables las formas divalentes. Las especies de $MnSO_4$, $MnHCO_3$ contribuyen ligeramente al Mn soluble total en suelos (McBride, 1994).

En suelos con buen drenaje el ión Mn^{2+} puede ser lavado, mientras que en suelos mal drenados, como los suelos estudiados se acumulan llegando a tener una acción tóxica.

Las concentraciones de Zn^{2+} extractable y total más altas las encontramos en los perfiles P-1, P-4, P-7 y P-10.

La concentración de Zn total en los 4 sitios están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968) y Bowen (1979).

Este metal está distribuido uniformemente en las rocas magmáticas y únicamente aumenta ligeramente en las máficas (80 a 120 $mg\ kg^{-1}$) y disminuye ligeramente en las rocas ácidas (40 a 60 $mg\ kg^{-1}$). Las fuentes mayores de Zn son: esfalerita (ZnS), esmitsonita ($ZnCO_3$) y hemimorfita, $Zn_4(Si_2O_7)(OH)_2 \cdot H_2O$.

Con valores de pH por debajo de 7.7, la especie predominante es el Zn^{2+} y a valores superiores a este pH lo que predomina es la especie neutra $Zn(OH)_2$. El $ZnCO_3$ y el $Zn(OH)_2$ son mucho más solubles que los complejos de Zn en el suelo.

Las concentraciones de Cu^{2+} extractable más altas las encontramos en los perfiles P-1, P-5, P-6 y P-10.

Las concentraciones de Cu total más altas se presentaron en los perfiles P-1, P-4, P-7 y P-10.

El Cu total en los 4 sitios estudiados están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968) y Bowen (1979); pero en el P-1 del sitio 1; P-4 y P-5 del sitio 2; P-6, P-7 y P-8 del sitio 3; P-9 y P-10 del sitio 4 sobrepasan el rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984) principalmente en las capas superficiales.

En las rocas ígneas existe una diferencia marcada en cuanto a la abundancia del Cu^{2+} entre el basalto y el granito. El Cu^{2+} podría ser más abundante en el basalto que en el granito, ya que los sulfuros y los silicatos de hierro y magnesio son más abundantes en el basalto. Cuando una solución permanece en estado de oxidación y ligeramente ácida, el Cu^{2+} no puede precipitar ya que los compuestos de Cu^{2+} con algunos aniones de la solución del suelo son solubles. En los suelos de chinampa, donde las condiciones son más reductoras se forma en la solución el complejo de cloruro cuproso, $CuCl_2$. Al cambiar la solución a pH

alcalino puede precipitar el Cu_2O y bajo condiciones fuertemente reductoras puede precipitar el metal activo, lo cual se demuestra por la presencia de Cu metálico en suelos pantanosos, en donde habrá el suficiente H_2S como para causar la precipitación del Cu como CuS ó Cu_2S , ambos muy insolubles (McBride, 1994).

El cobre se presenta principalmente como Cu^{2+} adsorbido en los minerales arcillosos y/o ligados por la materia orgánica. El uso de abonos orgánicos sobrepasan los niveles críticos de Cu^{2+} extractable en los suelos de la capa arable. Estos suelos por presentar pH alcalino el Cu se precipita como $\text{Cu}(\text{OH})_2$ o CuCO_3 .

Las concentraciones más altas de Ni^{2+} extractable se presentaron en los perfiles P-1, P-3, P-6 y P-9.

Las concentraciones más altas de Ni total se presentaron en los perfiles P-2, P-5, P-6 y P-10.

Las concentraciones de Ni total en los 4 sitios están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968) y Bowen (1979); sin embargo, las concentraciones en el P-2 del sitio 1 y P-10 del sitio 4 están por arriba del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984).

El contenido de Ni es alto en las rocas ultramáficas (1400 a 2000 mg kg^{-1}) y la concentración disminuye con el aumento de acidez de las rocas principalmente en granitos de 5 a 15 mg kg^{-1} . En las rocas sedimentarias el rango es de 5 a 90 mg kg^{-1} . Las rocas ígneas ricas en ferromagnesianos y sulfuros son ricas en Ni (por ejemplo piroxenas, olivino, biotita y clorita). El Ni está asociado con los CO_3^{2-} , PO_4^{3-} y SiO_2 . El Ni es fácilmente movilizado durante el intemperismo y se coprecipita con los óxidos de Fe y Mn. Sin embargo a diferencia del Mn y Fe, el Ni es relativamente estable en soluciones acuosas y migra a grandes distancias (Allaway, 1992).

Las rocas alcalinas y rocas sedimentarias tienen bajos contenidos de Ni.

Su distribución en los suelos estudiados esta relacionado con la materia orgánicas o a los óxidos amorfos y fracciones de arcilla (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

La concentración del Ni en los suelos, depende del contenido de Ni en las rocas parentales.

Las concentraciones más altas de Pb^{2+} extractable se presentaron en los perfiles P-1, P-3, P-6 y P-9.

Las concentraciones más altas de Pb total se presentaron en los perfiles P-2, P-4, P-8 y P-10.

Las concentraciones de Pb total en los 4 sitios están dentro del los rangos normales reportados por Allaway (1968) y Bowen (1979); pero en el P-2 del sitio 1; P-8 del sitio 3 y P-10 del sitio 4 sobrepasan el rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984), principalmente en las capas de 0a 10 y 30 a 40 cm de profundidad.

Las rocas ultramáficas y sedimentos calcáreos están en el rango de 0.1 a 10 mg kg^{-1} . El promedio de Pb en la corteza terrestre es de aproximadamente 15 mg kg^{-1} . El Pb en la corteza terrestre es de aproximadamente 15 mg kg^{-1} . El Pb tiene propiedades calcófilicas y su forma primaria en estado natural es la galena (PbS). Durante el intemperismo, el PbS se oxida lentamente y tiene la habilidad de formar CO_3^{2-} y ser incorporado a los minerales de arcilla, en óxidos de Fe y Mn y en materia orgánica. En suelos alcalinos la solubilidad se incrementa porque se forman complejos solubles de hidroxidos de Pb y Pb-orgánico (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El Pb es un metal pesado poco móvil especialmente bajo condiciones reductoras o alcalinas como es el caso de los suelos de chinampa estudiados. En estos suelos hay una fuerte complejación del Pb con la materia orgánica, especialmente en las capas más superficiales.

Las concentraciones más altas de Cr^{3+} extractable se presentaron en los perfiles P-1, P-3, P-7 y P-10.

Las concentraciones más altas de Cr total se presentaron en los perfiles P-2, P-4, P-7 y P-10.

El Cr total en los 4 sitios estudiados, están dentro de los rangos normales reportados por Alloway (1968) y Bowen (1979); sin embargo las concentraciones también están dentro de los rangos potencialmente peligrosos reportados por Kabata-Pendias y Pendias (1984) en los perfiles P-4 y P-5 del sitio 2; P-7 del sitio 3; y finalmente en los perfiles P-9 y P-10 del sitio 4 principalmente en las capas de 0 a 10 cm. Ver Cuadro C1.

Los suelos que se originan sobre serpentina contienen 0.2 a 0.4% de Cr. Los suelos arenosos y los histosoles son pobres en Cr y contienen en promedio de 47 a 12 mg kg^{-1} respectivamente.

En los suelos de chinampa el Cr es un catión inmóvil que forma complejos con la materia orgánica y se adsorbe a los óxidos y silicatos de arcillosos. A pH altos, una pequeña fracción del Cr en los suelos puede ser oxidado a cromato, CrO_4^{2-} ; (una forma muy tóxica de cromo); esta oxidación es originada por los óxidos de Mn.

Las concentraciones más altas de Cd^{2+} extractable se presentaron en los perfiles P-1, P-4, P-8 y P-9.

Las concentraciones más altas de Cd total se presentaron en los perfiles P-1, P-4, P-7 y P-10

Las concentraciones más altas de Cd total se presentaron en los perfiles P-1, P-4, P-7 y P-10. Las concentraciones de Cd total en los 4 sitios están por arriba de los rangos normales reportados por Alloway (1968) y Bowen (1979). Ver Apéndice D, Cuadro D2.

Si bien el Cd regularmente se presenta en varias formas complejas como CdCl^+ , CdOH^+ , CdHCO_3^+ , CdCl_3^- , CdCl_4^{2-} , $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ y $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$ y quelatos orgánicos (Kabata-Pendias y Pendias, 2001), además su elevado contenido en el suelo total nos indicaría uniones más estables con el suelo que impiden su extracción con el DTPA.

El factor principal que determina el contenido de Cd del suelo es la composición química del material parental. El Cd generalmente se acumula en suelos de turba por precipitación en minerales sulfurosos, y los niveles pueden también ser altos en suelos pobremente drenados o suelos de climas áridos y semiáridos.

A pH superiores a 7, el Cd puede co-precipitar con CaCO_3 o precipitar como CdCO_3 y también el CdPO_4 puede limitar la solubilidad. Por lo tanto, la movilidad y biodisponibilidad del Cd en suelos neutros a alcalinos es muy baja. Esto se ve en los resultados obtenidos en los suelos de chinampa, principalmente en los extractables con DTPA (Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Alloway, 1992; McBride, 1994).

7.4. ANÁLISIS DEL MATERIAL VEGETAL (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

7.4.1. Biomasa total, peso seco del follaje, peso seco de la raíz, longitud total, ancho y número de hojas en acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) desarrollada en invernadero

Los resultados de la biomasa total, peso seco del follaje, peso seco de la raíz, longitud total de la planta, ancho y número de hojas se muestran en el Cuadro 7.25. y Figura 7.20.

El análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el Método de Tukey se presentan en el Apéndice C, Cuadro C1.

La biomasa total más alta obtenida fue de 16.10 g maceta⁻¹ empleando el tratamiento 18 (30-1000-1000); le siguen los tratamientos 16 (30-1000-0), 15 (30-500-1000) y 17 (30-1000-500) con 15.28, 14.78 y 14.02 g maceta⁻¹ respectivamente. El rendimiento más bajo obtenido es de 7.85 g maceta⁻¹ con el tratamiento 1 (0-0-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de los valores de biomasa total de la planta en los 18 tratamientos empleados. El análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que hay diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos 15, 16 y 18 con respecto al testigo (0-0-0); y con los tratamiento del 2 al 14 y 17.

El rendimiento más alto obtenido en el peso seco del follaje fue de 13.08 g maceta⁻¹ empleando el tratamiento 18 (30-1000-1000). Le siguen los tratamientos 15 (30-500-1000), 17 (30-1000-500) y 16 (30-1000-0) con los rendimientos de 11.70, 11.42 y 11.30 g maceta⁻¹ respectivamente. El rendimiento más bajo obtenido es de 5.69 g maceta⁻¹ en el tratamiento 1 (0-0-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de los valores de peso seco del follaje. El análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) presenta diferencias significativas con respecto a los tratamientos 2 al 18.

Al mismo tiempo los tratamientos 15 al 18 tienen diferencias significativas con los tratamiento 2 al 5, 7 y 12, y éstos últimos presentan diferencias significativas con los tratamientos 6, 8 al 11 y 13.

El rendimiento más alto obtenido de peso seco de raíz fue de 4.62 g maceta⁻¹ empleando el tratamiento . 7 (0-1000-0), siguiendo los tratamientos 16 (30-1000-0) y 13 (30-500-0) con rendimientos de 3.90 y 3.15 g maceta⁻¹ respectivamente.

El análisis de varianza y prueba de Tukey indicaron que no hay diferencias significativas entre la medias de peso seco de raíz.

La longitud total de la planta más alta fue de 29.90 cm con el tratamiento 10 (30-0-0), le siguen los tratamientos 13 (30-500-0) y 18 (30-1000-1000) con rendimientos de 28.15 y 27.25 cm respectivamente. La longitud total más baja de la planta se obtuvo con en el tratamiento 1 (0-0-0) con un valor de 20.25 cm.

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de los valores de longitud de la planta. En la prueba de Tukey se observó que el tratamiento 1 (0-0-0) presenta

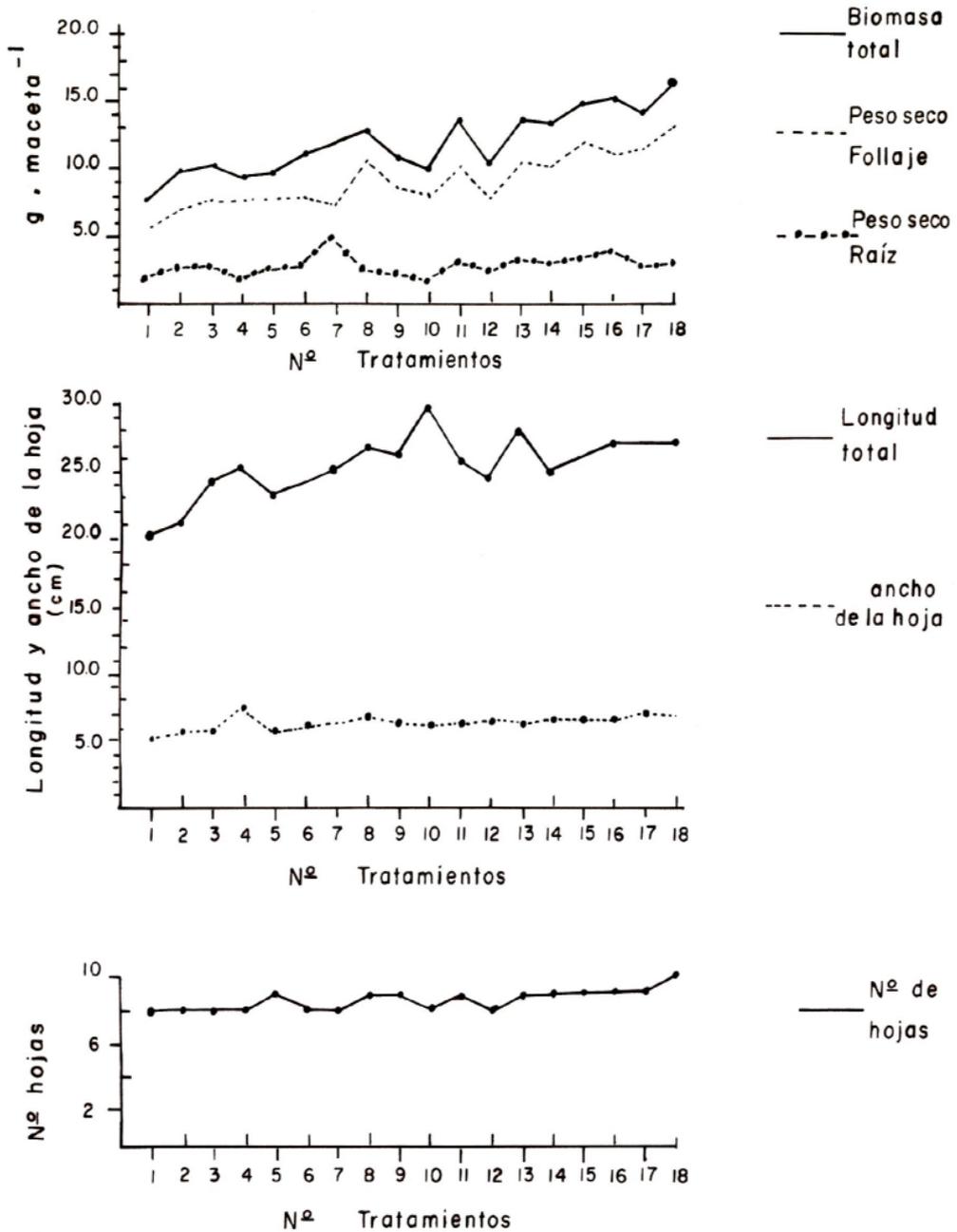
diferencias significativas con los tratamientos 2 al 18. Al mismo tiempo los tratamientos 13, 16 al 18 presentan diferencias significativas con los tratamientos 3 al 12, 14 y 15; éstos últimos tienen diferencias significativas con el tratamiento 2 (0-0-500).

Cuadro 7.25. Rendimiento en biomasa total, peso seco, longitud total, ancho y número de hojas en acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) desarrollada en invernadero

No.	Tratamientos			Biomasa Total	Peso Seco		Longitud Total	Ancho de la Hoja	No. Hojas
	C	Pb	Ni		Follaje	Raíz			
	mg kg ⁻¹			g maceta ⁻¹		cm			
1	0	0	0	7.85	5.69	1.82	20.25	5.26	8
2	0	0	500	9.69	7.24	2.47	21.35	5.52	8
3	0	0	1000	10.09	7.58	2.46	24.15	5.59	8
4	0	500	0	9.35	7.69	1.64	25.25	6.23	8
5	0	500	500	9.40	7.05	2.34	23.30	5.48	9
6	0	500	1000	11.03	8.22	2.83	24.02	6.02	8
7	0	1000	0	11.85	7.19	4.62	25.09	6.21	8
8	0	1000	500	12.70	10.48	2.15	26.81	6.79	9
9	0	1000	1000	10.71	8.52	2.07	25.90	6.39	9
10	0	0	0	9.98	8.20	1.66	29.90	6.06	8
11	30	0	5000	13.41	10.26	3.05	25.75	6.36	9
12	30	0	1000	10.33	8.04	2.25	24.50	6.49	8
13	30	500	0	13.67	10.46	3.15	28.15	6.27	9
14	30	500	500	13.15	10.22	2.95	25.15	6.66	9
15	30	500	1000	14.78	11.70	3.04	26.15	6.53	9
16	30	1000	0	15.28	11.30	3.90	26.96	6.48	9
17	30	1000	500	14.02	11.42	2.46	26.94	7.13	9
18	30	1000	1000	16.10	13.08	2.92	27.25	6.87	10

C = *Casuarina equisetifolia* L.

Figura 7.20 Rendimiento en Biomasa total, Peso seco de Follaje y Raíz, Longitud total, ancho de la hoja y N° de hojas en (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) desarrollada en el invernadero.



El ancho de la hojas más alto obtenido fue de 7.13 cm en el tratamiento 17 (30-1000-500); le siguen los tratamientos 18 (30-1000-1000), 8 (0-1000-500) y 14 (30-500-500) con valores de 6.87, 6.79 y 6.66 cm respectivamente. El ancho de la hoja más bajo obtenido fue de 5.26 cm en el tratamiento 1 (0-0-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de los valores del ancho de la hoja y en la prueba de Tukey se observó que el tratamiento 1 (0-0-0) presentó diferencias significativas con los tratamientos del 2 al 18. Al mismo tiempo el tratamiento 17 (30-1000-500) tuvo diferencias significativas con el resto de los tratamientos. Los tratamientos 4, 6, 7, 9 al 13, 15 y 16 tuvieron el mismo significado estadístico.

El número de hojas más alto obtenido fue de 10, con el tratamiento 18 (30-1000-100); le siguen los tratamientos 5 (0-500-500), 8 (0-1000-500), 9 (0-1000-1000), 11 (30-0-500), 13 (30-500-0), al 17 (30-1000-500) con 9 hojas y finalmente los tratamientos 1 (0-0-0) al 4 (0-500-0), 6 (0-500-1000), 8 (0-1000-500), 7 (0-1000-0), 10 (30-0-0) y 12 (30-0-1000) con 8 hojas.

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de los valores del ancho de la hoja y en la prueba de Tukey se observó que el tratamiento 18 tuvo diferencias significativas con respecto a los tratamientos 1, 2 y 6. Los tratamientos 3 al 5, 7 al 17 tuvieron el mismo significado estadístico.



Figura 7.21. Vista panorámica del desarrollo de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* a los 57 días de la siembra.

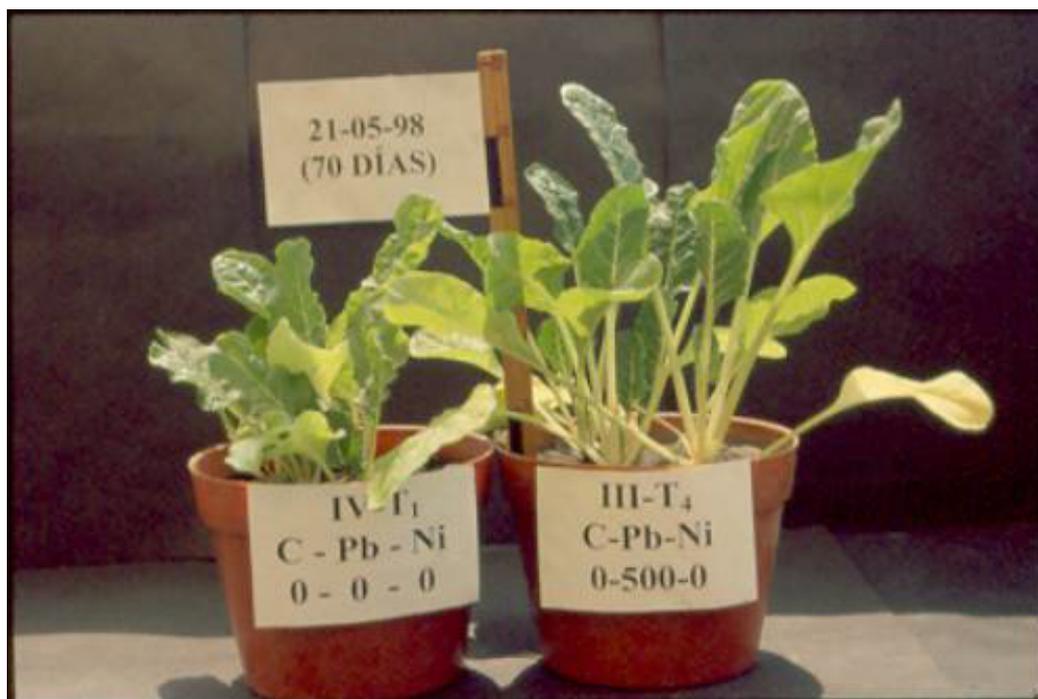


Figura 7.22 Comparación de los tratamientos 1 (0-0-0) y 4 (0-500-0) a los 70 días de la siembra.

7.4.2. Metales traza y metales pesados en acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) desarrollada en invernadero

Los resultados se muestran en el Cuadro 7.26. y en las Figuras 7.23 y 7.24.

El análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de los metales traza y metales pesados se presentan en el Apéndice C, Cuadro C2.

Con respecto a los contenidos de Fe^{2+} la concentración más alta obtenida se observa en el tratamiento 5 (0-500-0) con un valor de 76.00 mg kg^{-1} y en el tratamiento 12 (30-0-1000) con un valor de 74.12 mg kg^{-1} ; la concentración más baja obtenida fue con el tratamiento 15 (30-500-1000) con un valor de 52.00 mg kg^{-1} .

El análisis de varianza indicó que no hay diferencias significativas entre las medias de las concentraciones de Fe.

Con relación al contenido de Cu la concentración más alta obtenida fue con el tratamiento 13 (30-500-0) con un valor de 7.50 mg kg^{-1} ; le siguen los tratamientos 12 (30-0-1000) y 16 (30-1000-0) con un valor de 7.12 mg kg^{-1} ; la concentración más baja fue con los tratamientos 12 (30-0-1000) y 18 (30-1000-1000) con un valor de 1.75 mg kg^{-1} .

Cuadro 7.26. Contenido de metales traza y metales pesados en acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*) desarrollada en invernadero

No.	Tratamientos			Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
	C	Pb	Ni								
			mg kg ⁻¹								
1	0	0	0	57.12	6.25	27.63	19.55	3.75	7.12	1.87	1.5
2	0	0	500	63.72	3.00	32.87	24.50	5.50	10.50	1.75	1.62
3	0	0	1000	65.85	4.62	33.25	22.82	1.25	17.75	1.75	1.12
4	0	500	0	63.21	6.12	12.62	29.87	2.12	7.00	1.87	1.50
5	0	500	500	76.00	4.00	26.37	35.50	5.00	11.75	1.87	1.75
6	0	500	1000	62.00	4.00	26.37	24.25	7.62	13.37	2.00	1.87
7	0	1000	0	62.87	5.75	14.37	26.00	3.50	7.25	1.87	1.25
8	0	1000	500	62.00	2.75	17.37	16.62	4.62	10.62	2.62	1.37
9	0	1000	1000	58.87	3.75	20.00	15.75	4.37	19.50	2.25	1.25
10	0	0	0	64.12	6.12	10.37	26.50	3.37	11.25	2.00	1.00
11	30	0	5000	60.12	3.12	14.75	17.87	2.63	10.12	1.62	1.25
12	30	0	1000	74.12	1.75	27.25	21.50	1.63	16.75	2.00	1.25
13	30	500	0	53.12	7.5	13.50	26.75	3.00	8.37	2.62	1.37
14	30	500	500	55.37	3.00	17.62	18.37	5.12	15.50	1.75	1.25
15	30	500	1000	52.00	3.62	19.50	19.87	3.75	16.75	1.62	2.12
16	30	1000	0	63.62	7.12	14.62	27.62	5.25	6.87	1.5	1.25
17	30	1000	500	64.37	3.12	22.87	21.07	5.02	11.50	2.00	1.37
18	30	1000	1000	62.87	1.75	21.50	22.25	4.12	18.87	1.87	1.62

C = *Casuarina equisetifolia* L.

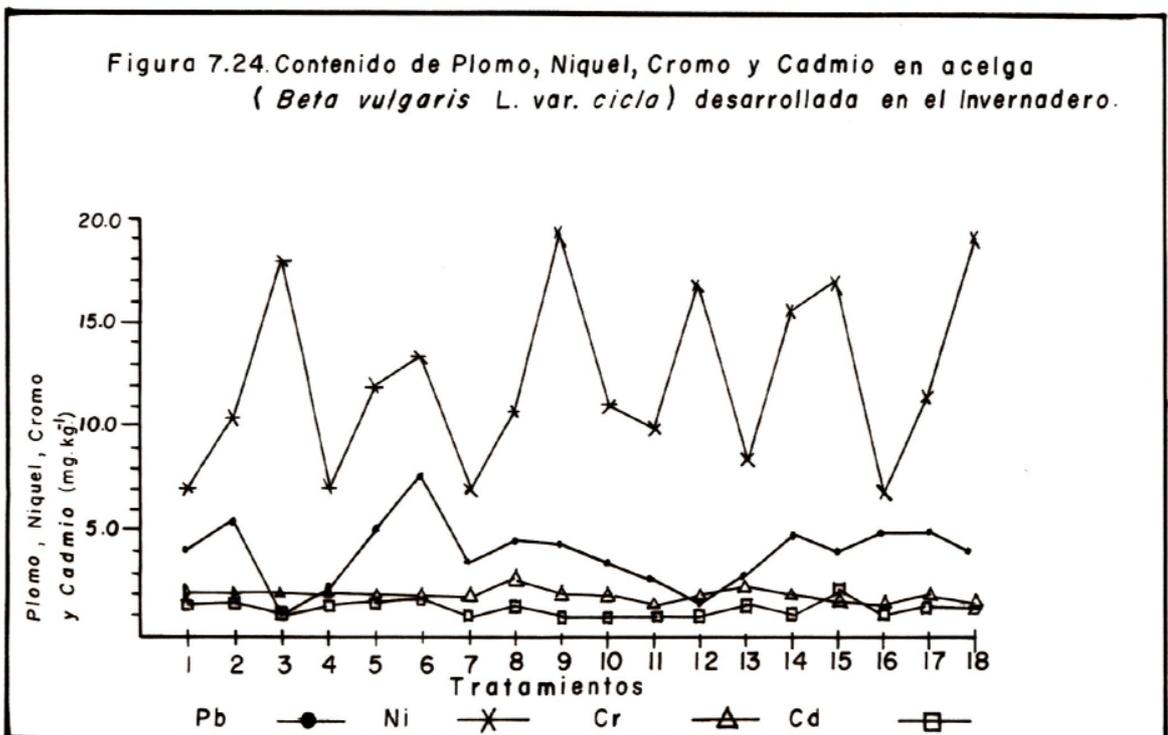
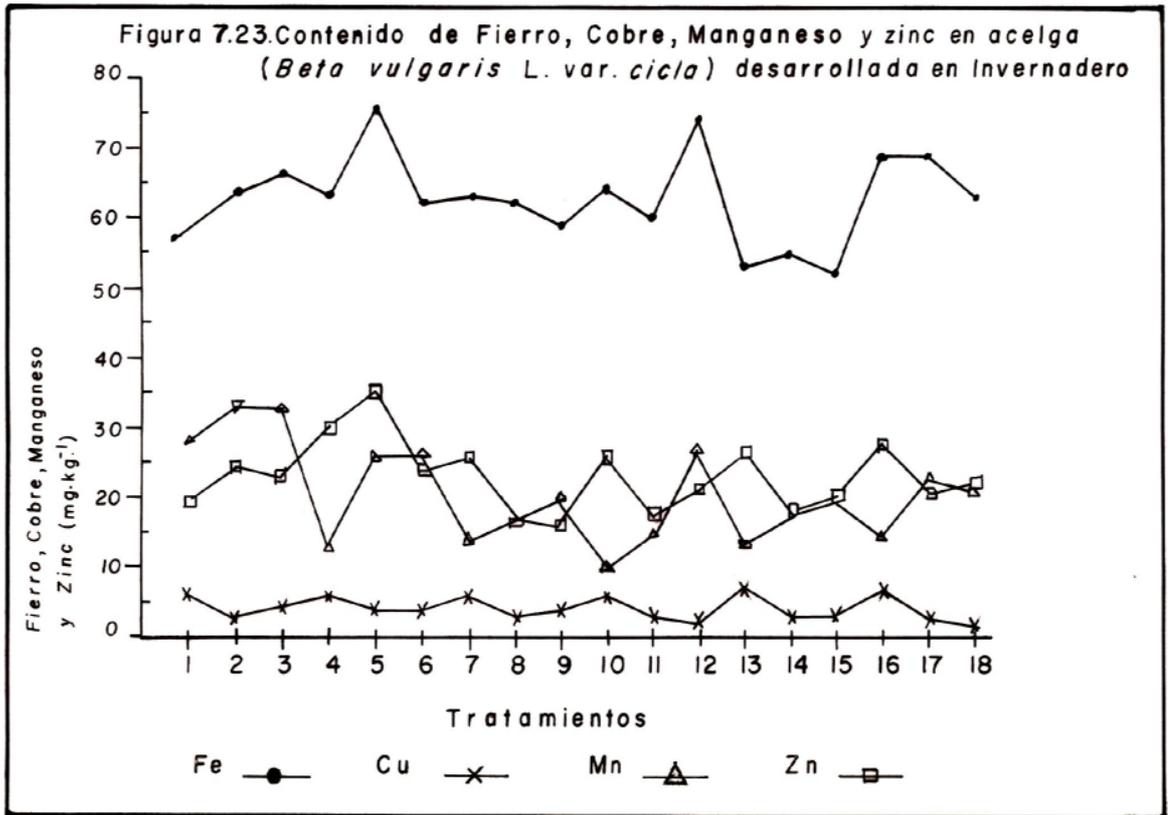




Figura 7.25. Comparación de los tratamientos 1 (0-0-0) y 18 (30-1000-100) de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* a los 70 días de la siembra.



Figura 7.26. Desarrollo de la raíz y follaje de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* a los 70 días después de la siembra, con el tratamiento 18 (30-1000-1000).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones por lo que en la prueba de Tukey se observó que los tratamientos 13 (30-500-0) y 16

(30-1000-0) tienen diferencias significativas ($p < 0.05$) con respecto a los tratamientos (30-0-1000) y 18 (30-1000-1000). Además en el tratamiento 1 (0-0-0) junto con los tratamientos 2 al 11, 14, 15 y 17 no son significativamente diferentes.

El contenido de Mn es más alto en los tratamientos 3 (0-0-1000) y 2 con concentraciones de 33.25 y 32.87 mg kg⁻¹ respectivamente; le siguen los tratamientos 1 (0-0-0) y 12 (30-0-1000) con valores de 27.63 y 27.25 mg kg⁻¹ respectivamente y finalmente el valor más bajo de 10.37 mg kg⁻¹ con en el tratamiento 10 (30-0-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Mn, y el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que los tratamientos 2 y 3 son significativamente diferentes con respecto a los tratamientos 4, al 18. El tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas con los tratamientos 5, 6, 8 9, 12, 14, 15, 17 y 18; pero si tiene diferencias significativas ($p < 0.05$) con los tratamientos 2, 3, 4, 7, 10, 11, 13 y 16.

El contenido de Zn es más alto en el tratamiento 5 (0-500-500); con un valor de 35.50 mg kg⁻¹; le sigue el tratamiento 4 (0-500-0) con un valor de 29.87 mg kg⁻¹; y la concentración más baja es de 15.75 mg kg⁻¹ con el tratamiento 9 (0-1000-1000) y 16.62 mg kg⁻¹ con el tratamiento 8 (0-1000-500).

El análisis de varianza indicó que no hay diferencias significativas entre las medias de las concentraciones del tratamiento 1 (0-0-0) con respecto a todos los tratamientos (2 al 18).

El contenido de Pb más alto es de 7.62 mg kg⁻¹ en el tratamiento 6 (0-500-1000) y el valor más bajo de 1.25 mg kg⁻¹ con el tratamiento 3 (0-0-1000).

El análisis de varianza indicó que no hay diferencias significativas entre las medias de las concentraciones de Pb.

El contenido de Ni más alto es de 19.50 mg kg⁻¹ con el tratamiento 9 (0-1000-1000); y el valor más bajo es de 6.87 mg kg⁻¹ con el tratamiento 16 (30-1000-0).

El análisis de varianza indicó que hay diferencias significativas entre las medias de las concentraciones de Ni y el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas con los tratamientos 4(0-500-0), 7 (0-1000-0) y 16 (30-1000-0); pero si es significativamente diferente con los tratamientos 2, 3, 5, 6, 8 al 15, 17 y 18.

Con respecto al contenido de Cr la concentración alta fue de 2.62 mg kg⁻¹ con los tratamientos 8 (0-1000-500) y 13 (30-500-0); le sigue el valor de 2.25 mg kg⁻¹ con el tratamiento 9 (0-1000-1000); y finalmente la concentración más baja es de 1.50 mg kg⁻¹ con el tratamiento 16 (30-1000-0).

El análisis de varianza indicó que no hay diferencias significativas entre las medias de las concentraciones de Cr.

Con respecto al contenido de Cd la concentración más alta fue de 2.12 mg kg⁻¹ con el tratamiento 15 (30-500-1000); y el valor más bajo fue de 1.00 mg kg⁻¹ con el tratamiento 10 (30-0-0).

El análisis de varianza indicó que hay diferencias significativas entre las medias de las concentraciones de Cd; y el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento

1 (0-0-0) no es significativamente diferente con respecto a los tratamientos 2 al 9, 11 al 14, 16, 17 y 18; pero si es significativamente diferente con los tratamientos 10 (30-0-0) y 15 (30-500-1000).

Con respecto a los análisis de correlación, se puede decir que la biomasa total tuvo una asociación positiva con el peso seco del follaje; peso seco de la raíz; longitud de la planta; ancho de la hoja y número de hojas ($r=0.91$, $r=0.65$, $r=0.71$, $r=0.72$ y $r=0.57$, $p<0.05$); y una asociación negativa con el Mn ($r=-0.38$, $p<0.05$).

El peso seco del follaje tuvo una asociación positiva con el peso seco de la raíz; longitud de la planta; ancho de la hoja y número de hojas ($r=0.28$, $r=0.71$, $r=0.72$, $r=0.57$, $p<0.05$); y una asociación negativa con el Mn ($r=-0.35$, $p<0.05$).



Figura 7.27. Desarrollo de la raíz y follaje de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* a los 70 días después de la siembra, con el tratamiento 7 (0-1000-0).

7.4.3. Discusión del análisis del material vegetal (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

Como se pudo observar en los resultados, los tratamientos 10, 16, 17 y 18 dieron una máxima respuesta de *Beta vulgaris* L. *cicla*. En éstos tratamientos están contenidas las máximas concentraciones de $Pb(NO_3)_2$, $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ (1000 mg kg^{-1}) y de composta de *Casuarina equisetifolia* L. (30 mg kg^{-1}).

La máxima respuesta puede estar relacionada directamente al efecto del ión NO_3^- que al del Pb. El Nitrógeno es parte integral de la molécula de clorofila. Por lo tanto un adecuado suministro de nitrógeno está asociado con vigorosos crecimientos vegetativos y un intenso color verde.

El efecto contrario se presenta cuando las plantas soportan deficiencias de nitrógeno, éstas se vuelven raquílicas y amarillas. Este amarillamiento o clorosis aparece primero en las hojas inferiores; las hojas superiores permanecen verdes.

El suministro de nitrógeno se relaciona también con los hidratos de carbono. Cuando las cantidades de nitrógeno son insuficientes, los hidratos de carbono se depositan en las células vegetativas causando un adelgazamiento de las mismas. Cuando el contenido de nitrógeno está en cantidades adecuadas y las condiciones son favorables para el crecimiento se forman proteínas a partir de los carbohidratos. Se depositan menos hidratos de carbono en la parte vegetativa, se forma más protoplasma y a causa de que el protoplasma está altamente hidratado, las plantas resultan más suculentas.

En algunos casos, la excesiva suculencia puede provocar que la planta sea más susceptible al ataque de enfermedades e insectos. En casos graves de deficiencia de Nitrógeno las hojas se vuelven marrones y mueren. La tendencia de las hojas jóvenes superiores a permanecer verdes mientras las inferiores amarillas mueren es un indicatriz de la movilidad del Nitrógeno dentro de la planta. (Tisdale y Nelson, 1982).

Los tratamientos que provocaron que las plantas tuvieran una muy baja respuesta o muy bajo desarrollo fueron con los tratamientos 1(0-0-0), 2 (0-0-500) y 4 (0-500-0), esto se reflejó en el deficiente peso de la biomasa total, peso seco del follaje y raíz, así como en la longitud total de la planta.

También la materia orgánica aplicada a las macetas en forma de composta (*Casuarina equisetifolia* L.) a partir de los tratamientos 10 al 18 ejerció una acción óptima reflejándose en una alta biomasa total, peso seco de follaje y raíz, longitud total de la planta, ancho y número de hojas. La materia orgánica tiene un papel muy importante sobre los parámetros relacionados con la estabilidad estructural e indirectamente también, sobre los parámetros relacionados con ella como son la circulación del agua, la penetración de las raíces de la planta reduciendo la disgregación de las partículas del suelo y el encostramiento (Labrador, 1996). La materia orgánica humificada, aumenta el poder amortiguador del suelo, reduciendo el riesgo de variaciones bruscas del pH; este aumento del poder tampón, es fundamental en los suelos agrícolas porque influye en la solubilidad/disponibilidad o toxicidad de los metales traza y/o metales pesados.

El desprendimiento de CO_2 en la atmósfera edáfica, acidifica las soluciones del suelo y favorece la disolución de compuestos minerales de baja solubilidad, con lo que asegura la disponibilidad para la planta de ciertos minerales que de otra manera serían inaccesibles.

La composta de *Casuarina equisetifolia* L. que se aplicó a las macetas tuvo un contenido de humedad de 104.51%, un pH de 7.1 y una C E. de 0.80 mS cm^{-1} (en el extracto); el contenido de M.O. fue de 35.28%.

El pH con agua destilada en la relación 1:2.5 fue de 6.75 y en la relación 1:10 fue de 7.1.

También el azufre se absorbe por las raíces de las plantas en forma de ión SO_4^{2-} y que éste se aplico a las macetas en forma de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. La mayoría del SO_4^{2-} se reduce en la planta y el azufre se encuentra en las formas $-\text{S}-\text{S}-$ y $-\text{SH}$. El S en forma de SO_4 en grandes cantidades puede también ser retenido en los tejidos y en los líquidos celulares sin que se observen daños (Tisdale y Nelson, 1982).

Una deficiencia de S retarda el crecimiento de la planta; se vuelven cloróticas y de tallos delgados. Estos síntomas en muchas plantas pueden parecerse a la deficiencia de nitrógeno.

Los contenidos metales traza y metales pesados analizados tuvieron el siguiente orden de concentración: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cd}$.

Como se vio en los resultados anteriores, se encontraron altos contenidos de Fe en el follaje, esto se debe a su movilidad en la planta. Se han reportado contenidos de 100 a 800 mg kg^{-1} en especies de hortalizas como espinaca (*Spinacea oleracea* L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.), brócoli (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*), col de brucas (*Brassica oleracea* var. *gemnifera* (DC.) Zenker) son ricas en Fe que las gramíneas (Mainardi, 1992).

Los contenidos de Zn en el follaje de *Beta vulgaris* L. var. *cicla*, está dentro de los rangos normales reportados por Bowen (1979); Chaney (1983); y Jones (1991) Ver Apéndice D, Cuadro D3 y D4.

La concentración de Mn en follaje de *Beta vulgaris* L. var. *cicla*, está dentro de los rangos normales reportados por Bowen, (1979); Chaney (1983) y Jones (1991), citado por Carrillo y Cajuste, (1992).

La concentración de Ni está dentro de los rangos potencialmente peligrosos reportados por Kabata-Pendias y Pendias (1984), McNichol y Beckett, (1985); Davis *et al.*, (1978); y Chaney (1983). Ver Apéndice D, Cuadro D3, D4 y D5.

La aplicación de Ni en forma de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ origino fitotoxicidad en la planta. Esto se debe a su gran movilidad dentro de la planta acumulándose generalmente en las hojas y semillas. El síntoma más común fitotoxicidad del Ni es la clorosis muy parecido a la inducida por Fe. En los tejidos vegetales la absorción de nutrimentos, desarrollo radicular, fotosíntesis, transpiración y el metabolismo son fuertemente retardados con altos contenidos de Ni (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

La concentración de Cu está dentro de los rangos normales reportados por Bowen (1979); Chaney, (1968) y Jones (1991); sin embargo también está dentro del rango potencialmente peligroso reportado por McNichol y Beckett (1985) y Jones (1991). Ver Apéndice D, Cuadros D3 y D5 respectivamente.

La concentración de Pb está dentro de los rangos normales reportados por Bowen (1979) y Allaway (1968). Ver Apéndice D, Cuadro D3, y D4.

La aplicación del $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ al suelo no originó aparentemente toxicidad dentro de la planta de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*).

Los altos contenidos de P en el suelo reduce los efectos de la toxicidad del Pb. Esta interferencia se debe a la habilidad del Pb para formar fosfatos insolubles en los tejidos vegetales, así como en el suelo.

El S también inhibe el transporte de Pb de las raíces a los brotes. Jones *et al.*, (1973) concluyó que la deficiencia del S aumentó considerablemente la movilidad del Pb dentro de la planta.

Con esto, se puede decir que el efecto del S que se encuentra en el $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ provocó que disminuyeran los contenidos de Pb en la acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*).

Las concentraciones de Cr están dentro de los rangos normales reportados por Bowen (1979) y Davis *et al.*, (1978).

Las concentraciones de Cd están dentro de los rangos normales reportados por Bowen (1979) y Allaway (1968). Ver Apéndice D, Cuadro D3 y D4 respectivamente.

7.5. METALES TRAZA Y METALES PESADOS EXTRACTABLES (DTPA) EN EL SUELO DE INVERNADERO ANTES DE LA SIEMBRA DE *Beta vulgaris* L. var. *cicla*

Los resultados se muestran en el Cuadro 7.27 y en las Figuras 7.28., 7.29. y 7.30.

El análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey se presenta en el Apéndice C, Cuadro C3.

El contenido de Fe^{2+} más alto se observa en el tratamiento 1 (0-0-0) con un valor de 58.73 mg kg^{-1} ; le sigue el tratamiento 10 (30-0-0) con una concentración de 56.37 mg kg^{-1} ; y finalmente el valor más bajo es de 24.74 mg kg^{-1} en el tratamiento 18 (30-1000-1000).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Fe^{2+} ; por lo que el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 tuvo diferencias significativas ($p < 0.05$) con todos los tratamientos (2 al 18).

El tratamiento 4 (0-500-0) tiene diferencias significativas ($p < 0.05$) con respecto a los tratamientos 9 (0-1000-1000); y 18 (30-1000-1000). Los tratamientos 2, 3, 5 al 8, 11, 12 y del 14 al 17 no tienen diferencias significativas.

El contenido de Cu^{2+} más alto se observa en el tratamiento 10 (30-0-0) con un valor de 1.51 mg kg^{-1} ; le sigue el tratamiento 1 (0-0-0) con una concentración de 1.42 mg kg^{-1} ; y el valor más bajo fue de 1.00 mg kg^{-1} en el tratamiento 7 (0-1000-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de concentraciones de Cu^{2+} ; por lo tanto el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 tiene diferencias significativas con respecto a todos los tratamientos (2 al 18).

Los tratamientos 2, 3, 5, 11, 13 y 14 no son significativamente diferentes. Los tratamientos 4, 6, 12 y 15 tienen diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

Cuadro 7.27. Contenido de metales traza y metales pesados extractables (DTPA) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

No.	Tratamientos			Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
	C	Pb	Ni								
	mg kg ⁻¹			mg kg ⁻¹							
1	0	0	0	58.73	1.42	15.29	1.3	1.63	1.53	0.10	0.26
2	0	0	500	37.89	1.23	9.55	1.04	1.80	146.67	0.11	0.24
3	0	0	1000	29.03	1.24	8.89	1.01	1.48	328.90	0.11	0.22
4	0	500	0	43.27	1.09	9.73	1.06	377.00	1.71	0.15	0.22
5	0	500	500	35.09	1.18	9.13	1.10	217.45	147.54	0.16	0.19
6	0	500	1000	30.4	1.14	9.01	1.01	325.56	237.25	0.2	0.23
7	0	1000	0	36.66	1.00	8.32	0.99	664.80	1.23	0.18	0.23
8	0	1000	500	32.54	1.06	9.03	1.00	506.70	163.51	0.19	0.22
9	0	1000	1000	25.00	1.01	7.54	0.89	458.00	229.75	0.21	0.28
10	0	0	0	56.37	1.51	16.74	2.37	1.68	1.44	0.13	0.31
11	30	0	5000	36.73	1.17	12.56	1.82	1.73	134.09	0.18	0.29
12	30	0	1000	26.39	1.16	9.33	1.66	1.53	308.50	0.15	0.33
13	30	500	0	40.78	1.17	10.76	2.06	341.00	1.15	0.18	0.25
14	30	500	500	34.55	1.18	10.30	1.80	219.97	141.34	0.2	0.29
15	30	500	1000	26.91	1.12	9.31	2.01	253.61	313.00	0.13	0.23
16	30	1000	0	38.09	1.04	9.79	1.96	515.14	1.19	0.13	0.22
17	30	1000	500	29.62	1.04	9.17	1.74	479.70	143.96	0.13	0.27
18	30	1000	1000	24.74	1.05	8.60	1.78	402.50	309.15	0.17	0.28

C = *Casuarina equisetifolia* L.

Figura 7.28. Contenido de Hierro, Cobre, Manganeso y Zinc extractables (DTPA) en el suelo de Invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

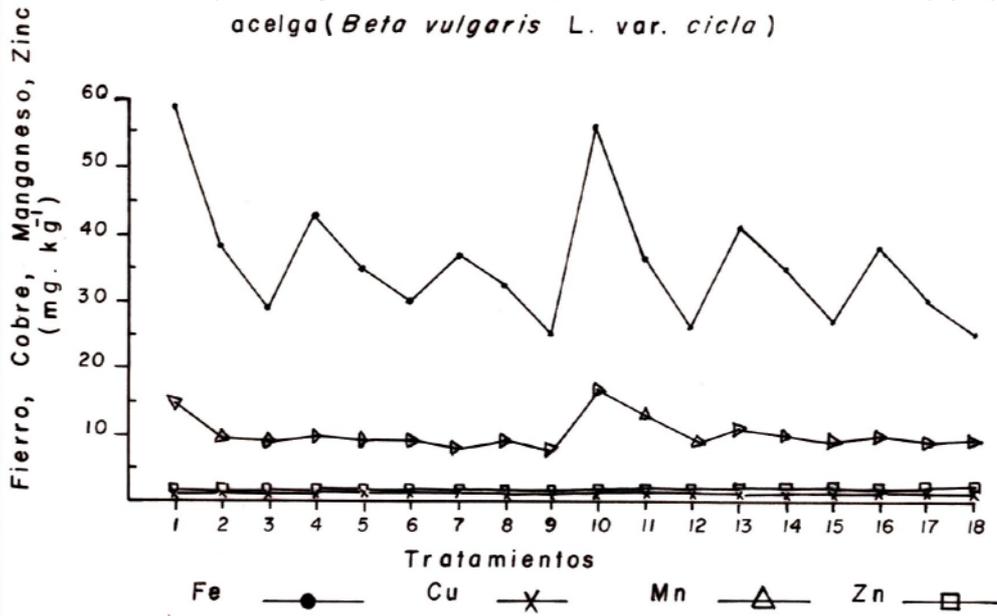


Figura 7.29 Contenido de Plomo y Niquel extractables (DTPA) en el suelo de Invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

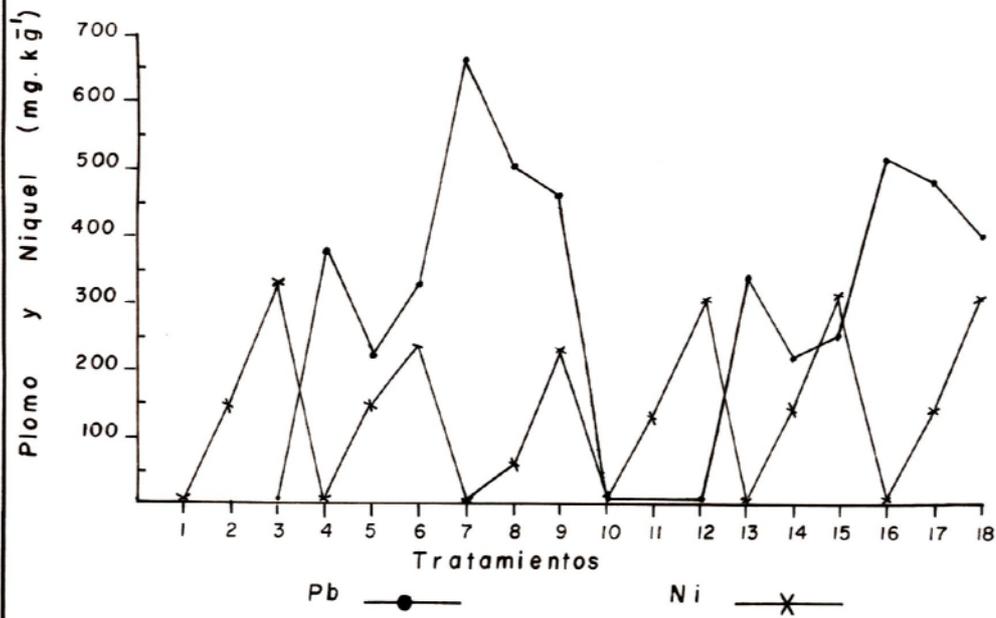
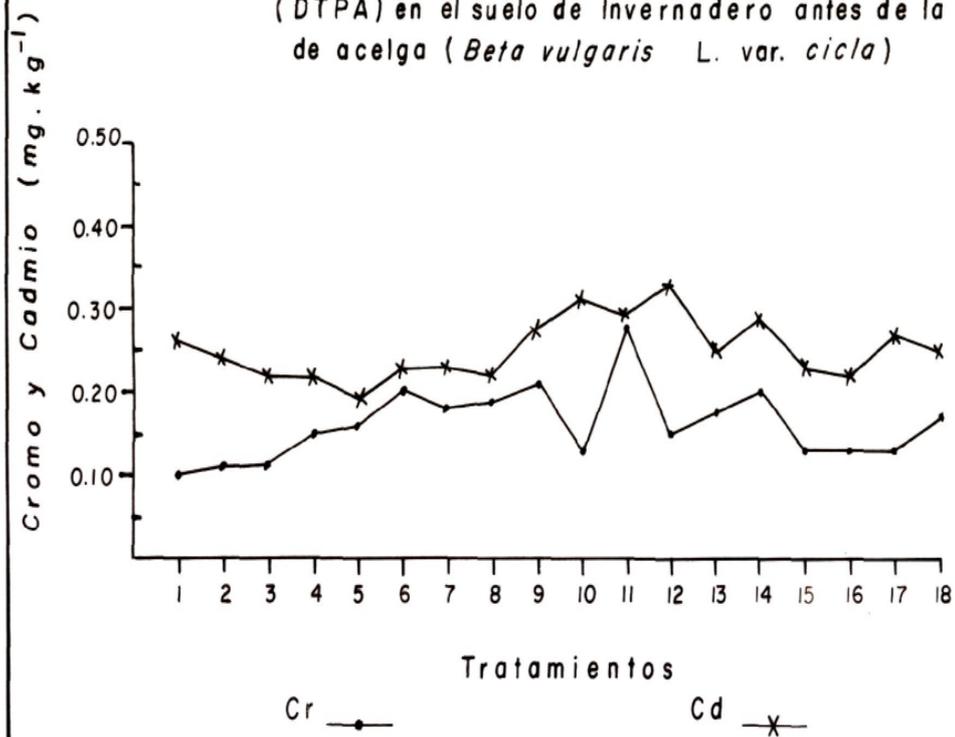


Figura 7.30 Contenido de metales de Cromo y Cadmio extractables (DTPA) en el suelo de Invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)



El contenido de Mn^{2+} más alto se observa en el tratamiento 10 (30-0-0) con un valor de 16.74 $mg\ kg^{-1}$; le sigue el tratamiento 1 (0-0-0) con una concentración de 15.29 $mg\ kg^{-1}$ y finalmente el valor más bajo es de 7.54 $mg\ kg^{-1}$ en el tratamiento 9 (0-1000-1000).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Mn^{2+} ; por lo tanto la prueba de Tukey indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) tiene diferencias significativas con los tratamientos 2 al 18. Los tratamientos 2 al 9, y del 11, 12, 14 al 18 no presentaron diferencias significativas.

El contenido de Zn^{2+} más alto se observa en el tratamiento 10 (30-0-0) con un valor de 2.37 $mg\ kg^{-1}$; le sigue el tratamiento 13 (30-500-0) con un valor de 2.06 $mg\ kg^{-1}$ y finalmente el valor más bajo es de 0.89 $mg\ kg^{-1}$ en el tratamiento 9 (0-1000-1000).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Zn^{2+} ; por lo tanto la prueba de Tukey indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas con el tratamiento 12 (30-0-1000), sin embargo presenta diferencias significativas con el resto de los tratamientos. Los tratamientos 2 al 9 no son significativamente diferentes.

El contenido de Pb^{2+} es más alto en el tratamiento 7 (0-1000-0) con un valor de 664.80 $mg\ kg^{-1}$ y el más bajo es de 1.38 $mg\ kg^{-1}$ en el tratamiento 1(0-0-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Pb^{2+} ; por lo tanto la prueba de Tukey indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) no presentó diferencias significativas con los tratamientos 2, 3, 10, 11 y 12; pero si presentó diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

El tratamiento 7 si presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) con el resto de los tratamientos.

Con respecto al contenido de Ni^{2+} , la concentración más alta es de 328.90 $mg\ kg^{-1}$ en el tratamiento 3 (0-0-1000); le sigue el tratamiento 15 (30-500-1000) con un valor de 313.00 $mg\ kg^{-1}$ y la concentración más baja es de 1.15 $mg\ kg^{-1}$ en el tratamiento 13 (30-500-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Ni^{2+} ; por lo tanto la prueba de Tukey indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas ($p < 0.05$) con los tratamientos 4, 7, 10, 13 y 16; los tratamientos 3, 12, 15 y 18 tampoco tienen diferencias significativas ($p < 0.05$).

El contenido de Cr^{2+} más alto está en el tratamiento 9 (0-1000-1000) con un valor de 0.21 $mg\ kg^{-1}$; le siguen los tratamientos 6 (0-500-1000) y 14 (30-500-500) con una concentración de 0.20 $mg\ kg^{-1}$; y finalmente el valor más bajo es de 0.10 $mg\ kg^{-1}$ en el tratamiento 1 (0-0-0).

No hubo diferencias significativas en todos los tratamientos.

El contenido de Cd^{2+} más alto fue de 0.33 $mg\ kg^{-1}$ con el tratamiento 12 (30-0-1000), le sigue el tratamiento 10 (30-0-0) con un valor de 0.31 $mg\ kg^{-1}$ y finalmente el tratamiento 5 (0-500-500) con un valor de 0.19 $mg\ kg^{-1}$.

El análisis de varianza practicado indicó que no existen diferencias significativas, entre las medias de las concentraciones.

7.6. METALES TRAZA Y METALES PESADOS EXTRACTABLES (DTPA) EN EL SUELO DE INVERNADERO DESPUÉS DE LA COSECHA DE *Beta vulgaris* L. var. *cicla*

Los resultados se muestran en el Cuadro 7.28. y en las Figuras 7.31., 7.32. y 7.33.

El análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey se presenta en el Apéndice C, Cuadro C4.

El contenido de Fe²⁺ más alto se observó en el tratamiento 1 (0-0-0) con un valor de 35.51 mg kg⁻¹, le sigue el tratamiento 10 (30-0-0) con una concentración de 35.45 mg·kg⁻¹ y finalmente el valor más bajo es de 22.33 mg kg⁻¹ en el tratamiento 18 (30-1000-1000).

El contenido de Cu²⁺ es más alto en los tratamientos 2 y 3 (0-0-500 y 0-0-1000) respectivamente con un valor de 1.24 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 17 (30-1000-500) y 18 (30-1000-1000) con un valor de 1.22 mg kg⁻¹ y finalmente el valor más bajo es de 1.03 mg kg⁻¹ con el tratamiento 16 (30-1000-0).

El contenido de Mn²⁺ es más alto en el tratamiento 10 (30-0-0) con un valor de 9.03 mg kg⁻¹; le sigue el tratamiento 13 (30-500-0) con un valor de 8.51 mg kg⁻¹; y finalmente el valor más bajo es de 5.03 mg kg⁻¹ empleando el tratamiento 5 (0-500-500).

El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones en éstos 3 elementos.

El contenido de Zn²⁺ es más alto en el tratamiento 10 (30-0-0) con una concentración de 1.91 mg kg⁻¹; le sigue el tratamiento 13 (30-500-0) con un valor de 1.69 mg kg⁻¹; y finalmente el tratamiento 9 (0-1000-1000), con una concentración de 0.86 mg kg⁻¹.

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones, por lo que el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 10 (30-0-0) tiene diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

Cuadro 7.28. Contenido de metales traza y metales pesados extractables (DTPA) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

No.	Tratamientos			Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
	C	Pb	Ni								
			mg kg ⁻¹								
1	0	0	0	35.51	1.08	7.97	1.14	1.38	1.55	0.09	0.06
2	0	0	500	27.91	1.24	6.44	1.07	1.63	113.37	0.12	0.04
3	0	0	1000	23.39	1.24	5.32	0.93	1.75	222.6	0.12	0.05
4	0	500	0	29.01	1.07	6.15	1.14	169.57	1.61	0.13	0.06
5	0	500	500	26.02	1.21	5.03	0.93	211.42	136.92	0.12	0.04
6	0	500	1000	27.02	1.15	6.32	0.97	286.42	154.75	0.10	0.05
7	0	1000	0	20.39	1.09	5.70	1.03	401.70	1.66	0.12	0.04
8	0	1000	500	25.96	1.14	5.49	0.91	458.85	132.73	0.10	0.04
9	0	1000	1000	21.18	1.15	5.07	0.86	433.37	231.75	0.12	0.04
10	0	0	0	35.45	1.21	9.03	1.91	1.50	1.85	0.13	0.06
11	30	0	5000	30.63	1.22	7.50	1.40	1.39	91.53	0.13	0.04
12	30	0	1000	26.47	1.18	6.39	1.33	1.39	259.97	0.12	0.06
13	30	500	0	34.44	1.09	8.51	1.69	211.47	1.96	0.10	0.06
14	30	500	500	28.79	1.14	7.65	1.43	224.12	132.96	0.13	0.05
15	30	500	1000	24.09	1.14	6.54	1.42	225.4	263.87	0.11	0.04
16	30	1000	0	27.48	1.03	7.85	1.61	299.82	1.83	0.10	0.06
17	30	1000	500	27.48	1.22	6.58	1.52	554.62	139.15	0.11	0.05
18	30	1000	1000	22.33	1.22	5.73	1.20	405.75	247.00	0.10	0.04

C = *Casuarina equisetifolia* L.

Figura 7.31. Contenido de Hierro, Cobre, Manganeso y Zinc extractables (DTPA) en el suelo de Invernadero después de la cosecha de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

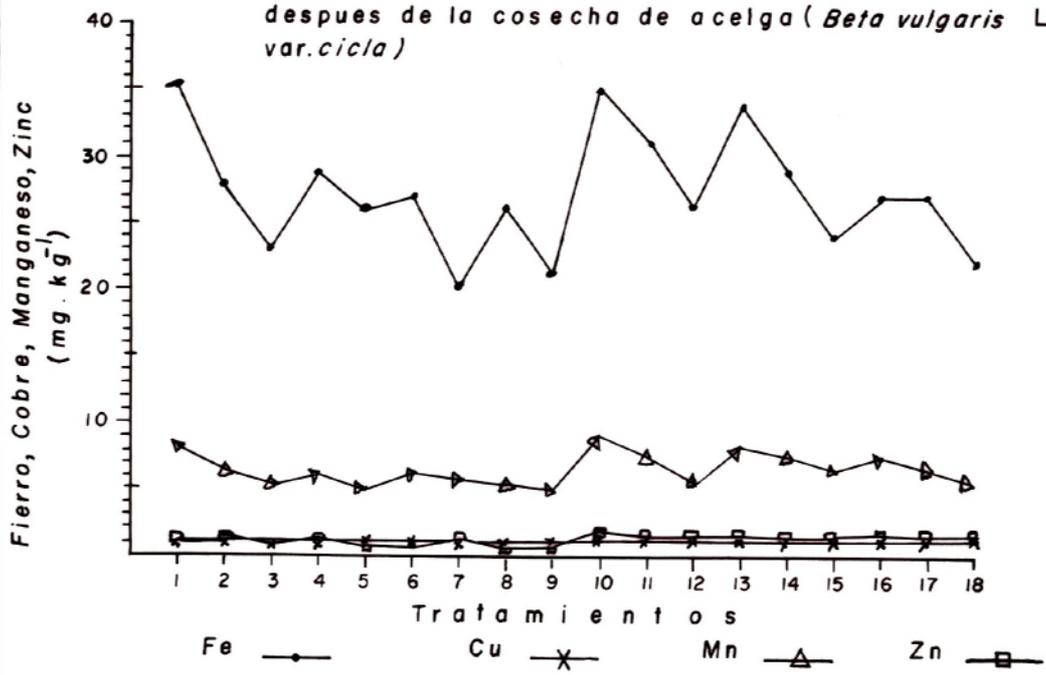


Figura 7.32. Contenido de Plomo y Niquel extractables (DTPA) en el suelo de Invernadero después de la cosecha de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

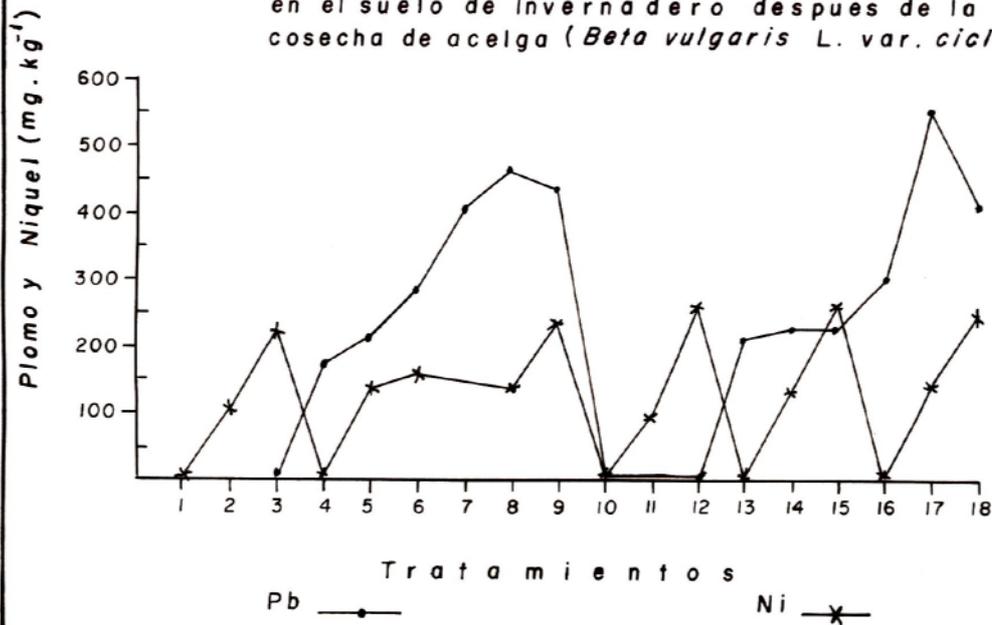
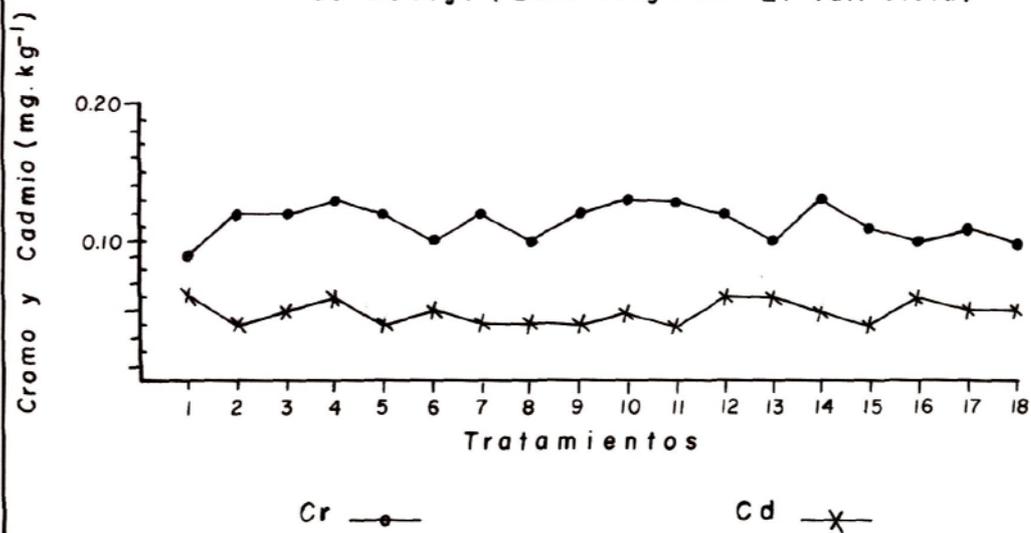


Figura 7.33 Contenido de Cromo y Cadmio extractables(DTPA) en el suelo de invernadero despues de la cosecha de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)



El Tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas con el tratamiento 4 (0-500-0), y con el resto de los tratamientos tiene diferencias significativas.

Los tratamientos 3, 5, 6 y 8 no tienen diferencias significativas, lo mismo se puede decir con los tratamientos 11, 14, 15 y 17.

El contenido de Pb^{2+} es más alto en el tratamiento 17(30-1000-500), con un valor de 554.62 mg kg^{-1} ; le siguen los tratamientos 8 (0-1000-500); 9 (0-1000-1000) y 18 (30-1000-1000) con concentraciones de 458.85, 433.37 y 405.75 mg kg^{-1} respectivamente; el valor más bajo es de 1.39 mg kg^{-1} en los tratamientos 11 y 12 (30-0-500) y (30-0-1000) respectivamente.

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Pb^{2+} y el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 no tiene diferencias significativas con los tratamientos 2, 3, 10, 11 y 12; pero si hay diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

Los tratamientos 5, 13, 14 y 15 no tienen diferencias significativas entre ellos, y con el resto de los tratamientos si hay diferencias significativas.

El contenido de Ni^{2+} más alto se encuentra en el tratamiento 15 (30-500-1000), con un valor de 263.87 mg kg^{-1} de Ni^{2+} ; le siguen los tratamientos 12 (30-0-1000); 18 (30-1000-1000); 9 (0-1000-1000) y 3 (0-0-1000) con concentraciones de 259.97, 247.00, 231.75 y 222.60 mg kg^{-1} de Ni^{2+} respectivamente.

El valor más bajo es de 1.55 mg kg^{-1} de Ni^{2+} en el tratamiento 1 (0-0-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Ni^{2+} y el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 no tiene diferencias significativas con los tratamientos 4, 7, 10, 13 y 16; pero si hay diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

Con los tratamientos 5, 8, 14 y 17 no hay diferencias significativas entre ellos.

El contenido de Cr^{3+} más alto se observa en los tratamientos 4 (0-500-0); 10 (30-0-0); 11 (30-0-500) y 14 (30-500-500); con un valor de 0.13 mg kg^{-1} ; le siguen los tratamientos 2 (0-0-500); 9 (0-1000-1000); 5 (0-500-500); 1 (0-0-0); 3 (0-0-1000) y 12 (30-0-1000), con una concentración de 0.12 mg kg^{-1} ; y finalmente el valor mas bajo es de 0.08 mg kg^{-1} con el tratamiento 1 (0-0-0).

El contenido de Cd^{2+} es más alto en el tratamiento 13 (30-500-0); con un valor de 0.07 mg kg^{-1} ; le sigue el tratamiento 1(0-0-0), 4 (0-500-0), 6 (0-500-1000), y 12 (30-0-1000) con un valor de 0.06 mg kg^{-1} y finalmente el valor más bajo es de 0.04 mg kg^{-1} en los tratamientos 2, 5, 7, 8, 9, 11 y 18.

El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Cr^{3+} y Cd^{2+} .

7.6.1. Discusión de los metales traza y metales pesados extractables (DTPA) antes de la siembra y después de la cosecha de *Beta vulgaris* L. var. *cicla*

Los metales traza y metales pesados extractables (DTPA) antes de la siembra tuvieron el siguiente orden de concentración: Pb>Ni>Fe>Mn>Zn>Cu>Cd>Cr.

Los metales traza y metales pesados extractables (DTPA) después de la cosecha, tuvieron el siguiente orden de concentración: Pb>Ni>Fe>Mn>Zn>Cu>Cr>Cd.

Las concentraciones de estos metales fueron más bajas comparados con los totales; esta baja disponibilidad se debe a la naturaleza de los sitios de intercambio y al pH alcalino. Los metales probablemente se encuentran en forma adsorbida y fijada en el suelo precipitándose como hidróxidos, carbonatos, sulfatos o fosfatos. Estos metales son los que son fácilmente captados por la planta.

7.7. METALES TRAZA Y METALES PESADOS TOTALES (PIXE) EN EL SUELO DE INVERNADERO ANTES DE LA SIEMBRA DE *Beta vulgaris* L. var. *cicla*.

Los resultados se muestran en el Cuadro 7.29. y en las Figuras 7.34., 7.35., 7.36. y 7.37.

El análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey se muestran en el Apéndice C, Cuadro C5.

El contenido de Fe más alto se observa en el tratamiento 18 (30-1000-1000) con un valor de 26 133.70 mg kg⁻¹; le sigue el tratamiento 4 (0-500-0) con una concentración de 20 465.25 mg kg⁻¹ y finalmente el valor más bajo es de 7 861.32 mg kg⁻¹ en el tratamiento 8 (0-1000-500).

El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones.

El contenido de Cu es más alto en el tratamiento 8 (0-1000-500) con un valor de 315.85 mg kg⁻¹; le sigue el tratamiento 18 (30-1000-1000) con una concentración de 213.30 mg kg⁻¹; y finalmente el contenido más bajo es con el tratamiento 2 (0-0-500) con un valor de 16.15 mg kg⁻¹.

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Cu por lo que el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas con los tratamientos 2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, al 17; pero si existen diferencias significativas con los tratamientos 5 (0-500-500), 8 (0-1000-500) y 15 (30-500-1000). El contenido de Mn es más alto en el tratamiento 4 (0-500-0) con un valor de 564.10 mg kg⁻¹; le sigue el tratamiento 7 (0-1000-0) con un valor de 348.75 mg kg⁻¹ y finalmente el valor más bajo es de 109.93 mg kg⁻¹ en el tratamiento 8 (0-1000-500). El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones.

El contenido de Zn es más alto en el tratamiento 5 (0-500-500) con un valor de 132.65 mg kg⁻¹; le sigue el tratamiento 12 (30-0-1000) con una concentración de 54.74 mg kg⁻¹ y finalmente el valor mas bajo es de 18.73 mg kg⁻¹ con el tratamiento 7 (0-1000-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Zn por lo que el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas con los tratamientos 2, 3, 4, 6, 8 al 12, 14 al 18; pero significativamente diferente con los tratamientos 5 (0-500-500), 7 (0-1000-0) y 13 (30-500-0).

Cuadro 7.29. Contenido de metales traza y metales pesados totales (PIXE) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

No.	Tratamientos			Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
	C	Pb	Ni								
			mg kg ⁻¹								
1	0	0	0	11598.05	24.70	168.83	38.25	52.73	42.65	103.18	253.28
2	0	0	500	11826.97	16.15	255.83	39.35	57.60	794.58	274.33	239.83
3	0	0	1000	12422.25	32.10	224.35	34.35	22.28	1153.07	86.90	210.08
4	0	500	0	20465.25	56.33	564.10	50.95	126.45	184.72	283.13	746.83
5	0	500	500	10504.97	148.08	200.13	132.65	157.57	363.00	91.35	220.83
6	0	500	1000	10919.50	37.23	113.55	34.53	456.13	930.18	45.48	217.03
7	0	1000	0	13159.95	29.35	348.75	18.73	921.45	28.43	87.35	459.20
8	0	1000	500	7861.32	315.85	109.93	46.68	480.78	355.35	123.55	153.95
9	0	1000	1000	10315.10	25.55	147.08	36.60	730.15	925.80	56.30	149.08
10	0	0	0	12243.22	17.9	125.43	44.73	32.68	9.55	44.43	386.10
11	30	0	5000	11732.57	23.73	178.95	26.78	22.75	375.63	55.03	410.10
12	30	0	1000	12970.65	46.48	221.83	54.73	17.18	994.08	55.65	234.73
13	30	500	0	11634.62	27.05	149.63	20.70	330.53	15.20	38.73	493.70
14	30	500	500	11587.97	42.55	184.93	38.08	285.63	527.28	32.33	473.20
15	30	500	1000	11197.37	20.28	151.55	38.85	392.15	701.55	35.28	546.73
16	30	1000	0	11078.50	25.43	123.00	33.60	712.03	32.80	13.75	312.45
17	30	1000	500	10922.66	10.27	150.10	43.58	663.13	599.45	26.45	490.73
18	30	1000	1000	26133.70	213.30	294.23	53.55	726.30	990.40	93.85	259.68

C= *Casuarina equisetifolia* L.

Figura 7.34 Contenido de Hierro Total (PIXE) en el suelo de Invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

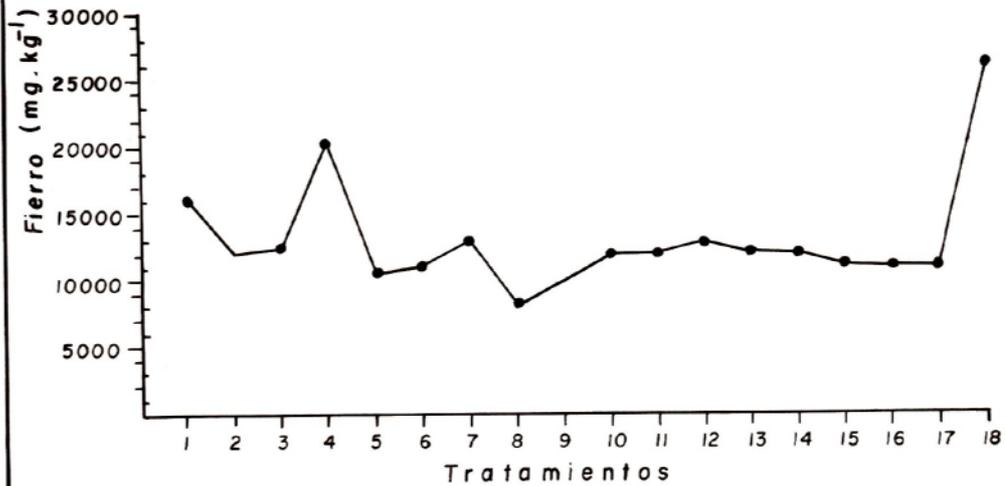


Figura 7.35 Contenido de Cobre, Manganeso y Zinc Total (PIXE) en el suelo de Invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

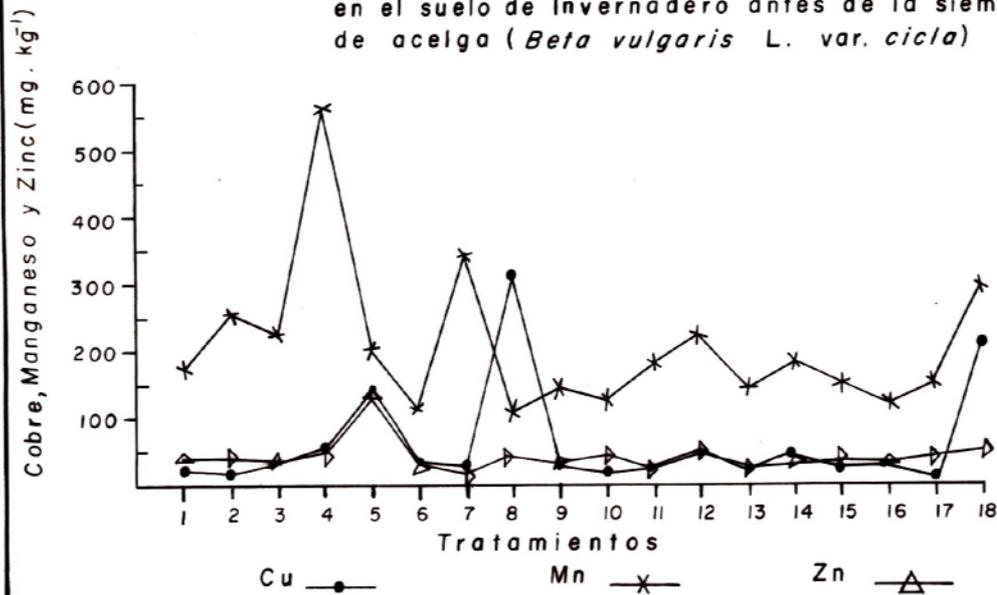


Figura 7.36 Contenido de Plomo y Niquel Total (PIXE) en el suelo de Invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris L. var. cicla*)

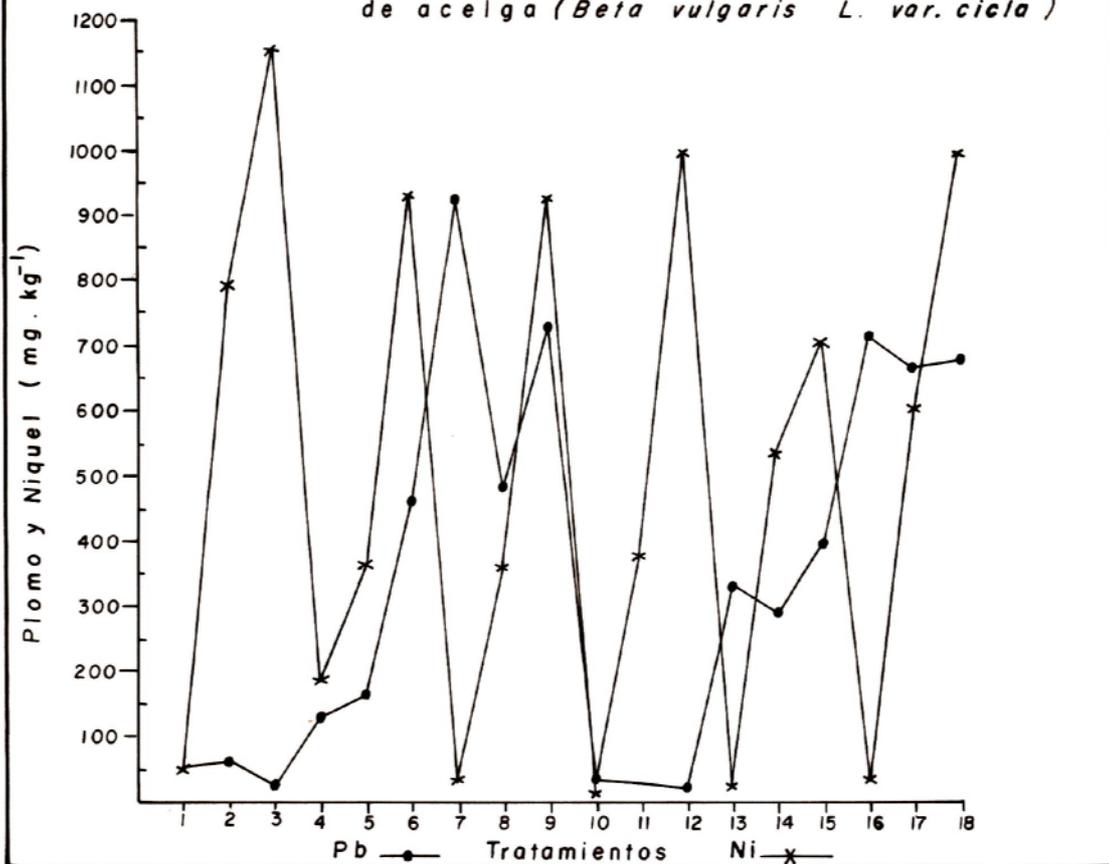
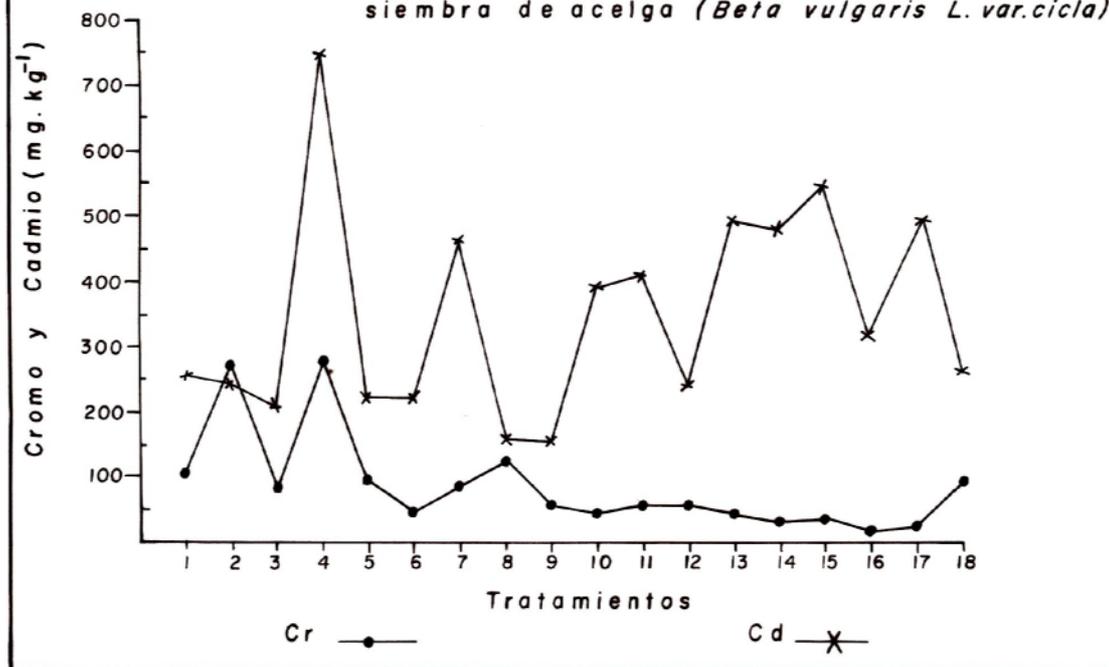


Figura 7.37 Contenido de Cromo y Cadmio Total (PIXE) en el suelo de Invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris L. var. cicla*)



El contenido de Pb más alto se observa en los tratamientos 7 (0-1000-0) con un valor de 921.45 mg kg⁻¹; el tratamiento 9 (0-1000-1000) con una concentración de 730.10 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 18 (30-1000-1000) con una concentración de 726.30 mg kg⁻¹; 16 (30-1000-0) con una concentración de 712.03 mg kg⁻¹; y finalmente el valor más bajo con una concentración de 17.18 mg kg⁻¹ con el tratamiento 12 (30-0-1000).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones por lo que el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que en el tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas con los tratamientos 2 (0-0-500), 4 (0-500-0), 5 (0-500-500) y 10 (30-0-0).

El contenido de Ni es más alto en el tratamiento 3 (0-0-1000) con un valor de 1 153.07 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 12 (30-0-1000) con un valor de 994.08 mg kg⁻¹; el tratamiento 18 (30-1000-1000) con un valor de 990.40 mg kg⁻¹; el tratamiento 6 (0-500-1000) con un valor de 930.18 mg kg⁻¹; el tratamiento 9 (0-1000-1000) con un valor de 925.80 mg kg⁻¹ y finalmente el tratamiento más bajo con un valor de 9.55 mg kg⁻¹ en el tratamiento 10 (30-0-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Ni por lo que el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 es significativamente diferente con el resto de todos los tratamientos (2 al 18).

Los tratamientos 7 (0-1000-0), 10 (30-0-0), 13 (30-500-0) y 16 (30-1000-0) no tienen diferencias significativas; así como los tratamientos 12 (30-0-1000) y 18 (30-1000-1000).

El contenido de Cr es más alto en el tratamiento 4 (0-500-0) con un valor de 283.13 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 2 (0-0-500) con un valor de 274.33 mg kg⁻¹; 8 (0-1000-500) con un valor de 123.55 mg kg⁻¹;

1 (0-0-0) con un valor de 103.17 mg kg⁻¹; y finalmente el valor más bajo es de 13.75 mg kg⁻¹ en el tratamiento 16 (30-1000-0).

El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$).

El contenido de Cd más alto se encuentra en el tratamiento 4 (0-500-0) con un valor de 746.83 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 15 (30-500-1000) con una concentración de 546.73 mg kg⁻¹; 13 (30-500-0) con una concentración de 493.70 mg kg⁻¹; 17 (30-1000-500) con una concentración de 490.73 mg kg⁻¹; 14 (30-500-500) con un valor de 473.20 mg kg⁻¹; y finalmente el valor más bajo es en el tratamiento 9 (0-1000-1000) con una concentración de 149.08 mg kg⁻¹.

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones, por lo tanto el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas con los tratamientos 2, 5, 6, 10, 11, 12, 16 y 18; y es significativamente diferente con el resto de los tratamientos.

7.8. METALES TRAZA Y METALES PESADOS TOTALES (PIXE) EN EL SUELO DE INVERNADERO DESPUÉS DE LA COSECHA DE *Beta vulgaris* L. var. *cicla*.

Los resultados se muestran en el Cuadro 7.30. y en las Figuras 7.38., 7.39., 7.40. y 7.41.

El análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey se muestran en el Apéndice C, Cuadro C6.

El contenido de Fe más alto se observó en los tratamientos 8 (0-500-1000) con un valor de 9 220.55 mg kg⁻¹ y 18 (30-1000-1000) con una concentración de 9 105.20 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 13 (30-500-0) con una concentración de 8 831.30 mg kg⁻¹; 1 (0-0-0) con un valor de 8 681.20 mg kg⁻¹; 4 (0-500-9) con una concentración de 8 286.67 mg kg⁻¹; 3 (0-0-1000) con un contenido de 8 245.85 mg kg⁻¹ y 2 (0-0-500) con un valor de 8 049.05 mg kg⁻¹.

Y finalmente el valor más bajo es de 6 369.10 mg kg⁻¹ en el tratamiento 17 (30-1000-500).

El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones.

El contenido de Cu más alto se observó en el tratamiento 2 (0-0-500) con un valor de 132.45 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 18 (30-1000-1000) con una concentración de 93.95 mg kg⁻¹; 16 (30-1000-0) con un valor de 93.10 mg kg⁻¹; 15 (30-500-1000) con un contenido de 92.12 mg kg⁻¹; 14 (30-500-500) y 17 (30-1000-500) con un valor de 91.45 mg kg⁻¹. Y finalmente los valores más bajos son de 33.85 mg kg⁻¹ en el tratamiento 12 (30-0-1000) y 29.35 mg·kg⁻¹ en el tratamiento 9 (0-1000-1000).

El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Cu.

El contenido de Mn es más alto en el tratamiento 18 (30-1000-1000) con un valor de 690.58 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 15 (30-500-1000) con un valor de 395.15; mg kg⁻¹; el 17 (30-1000-500) con un valor de 385.13 mg kg⁻¹; el 2 (0-0-500) con un valor de 341.63 mg kg⁻¹; y finalmente el valor más bajo es de 68.70 mg kg⁻¹ en el tratamiento 12 (30-0-1000).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones de Mn, por lo que el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 no tiene diferencias significativas ($p < 0.05$) con los tratamientos 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 13 al 17.

Cuadro 7.30. Contenido de metales traza y -metales pesados totales (PIXE) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

No.	Tratamientos			Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd
	C	Pb	Ni								
mg kg ⁻¹			mg kg ⁻¹								
1	0	0	0	8681.20	77.22	232.30	80.38	23.33	35.00	8.25	21.10
2	0	0	500	8049.05	132.45	341.63	162.65	12.33	336.70	80.18	36.23
3	0	0	1000	8245.85	79.75	98.88	107.90	31.48	582.18	20.18	204.13
4	0	500	0	8286.67	60.10	107.50	98.33	293.23	27.45	20.65	378.63
5	0	500	500	6927.52	57.02	91.98	109.03	340.23	264.25	55.23	118.63
6	0	500	1000	6862.62	35.85	82.43	93.45	237.75	478.53	26.45	119.05
7	0	1000	0	7076.40	60.30	73.08	112.10	457.00	32.33	15.98	494.68
8	0	1000	500	9220.55	69.07	113.18	86.53	439.13	389.10	100.20	370.90
9	0	1000	1000	7645.85	29.35	229.23	59.78	434.48	620.75	81.35	228.98
10	0	0	0	7767.30	49.80	220.73	54.00	28.60	45.80	54.80	25.60
11	30	0	5000	7401.47	44.85	184.58	55.83	11.78	313.08	48.80	293.53
12	30	0	1000	7461.77	33.85	68.70	71.68	37.43	607.40	38.68	127.35
13	30	500	0	8831.30	43.90	200.40	83.63	317.93	18.90	195.88	99.85
14	30	500	500	6529.15	91.45	209.20	100.53	80.35	246.90	153.75	126.18
15	30	500	1000	6985.22	92.12	395.15	93.38	210.15	455.68	376.38	437.70
16	30	1000	0	6676.57	93.10	223.25	101.53	251.55	28.20	266.48	145.83
17	30	1000	500	6369.10	91.45	385.13	178.25	185.98	159.78	352.63	211.30
18	30	1000	1000	9105.20	93.95	690.58	91.65	422.18	709.68	667.08	298.98

C = *Casuarina equisetifolia* L.

Figura 7.38 Contenido de Hierro Total (Pixe) en el suelo de Invernadero despues de la cosecha de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

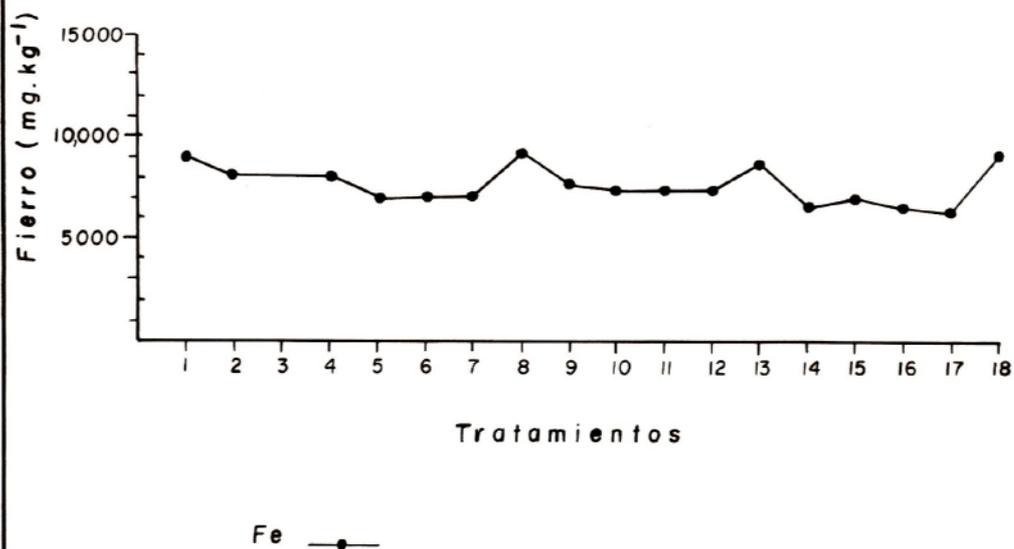
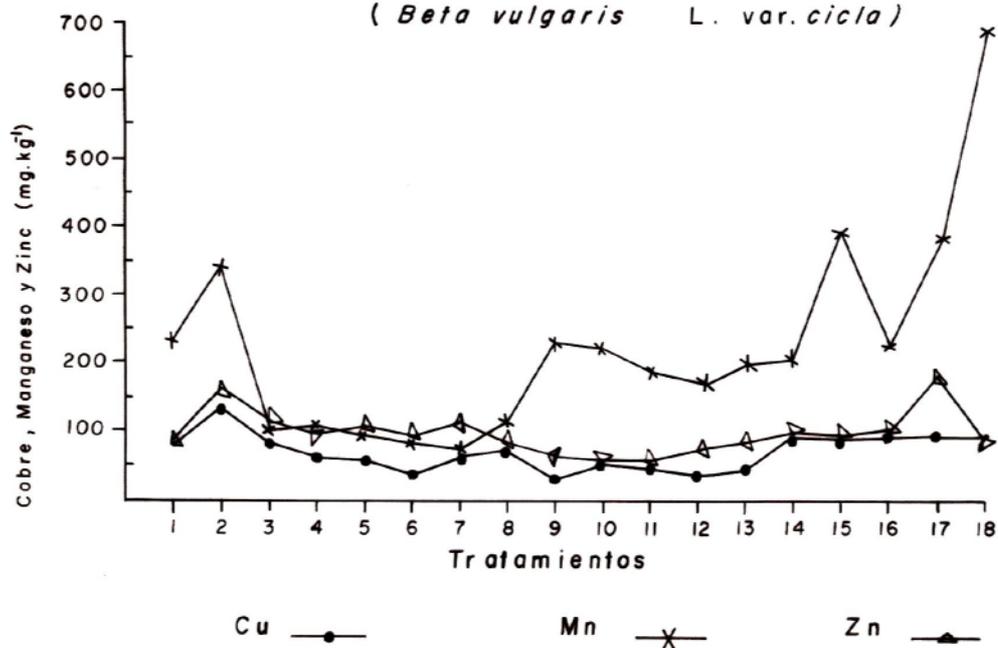
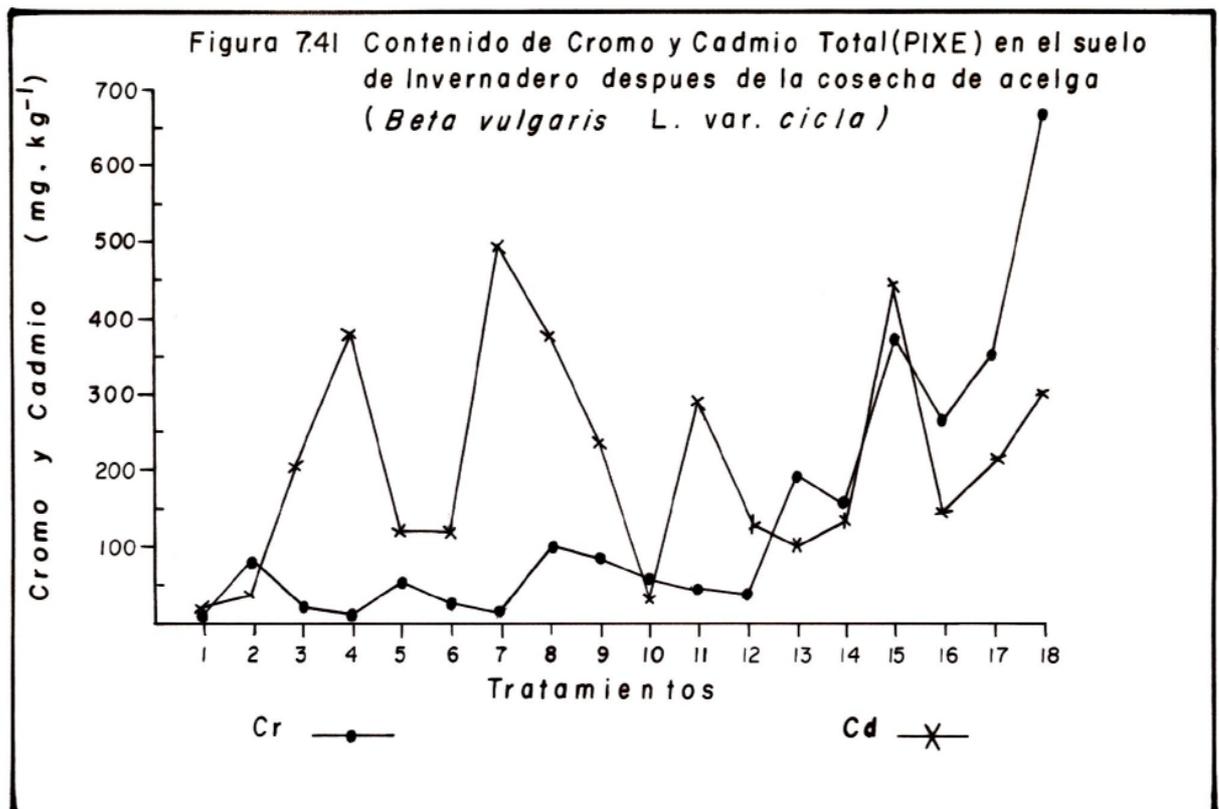
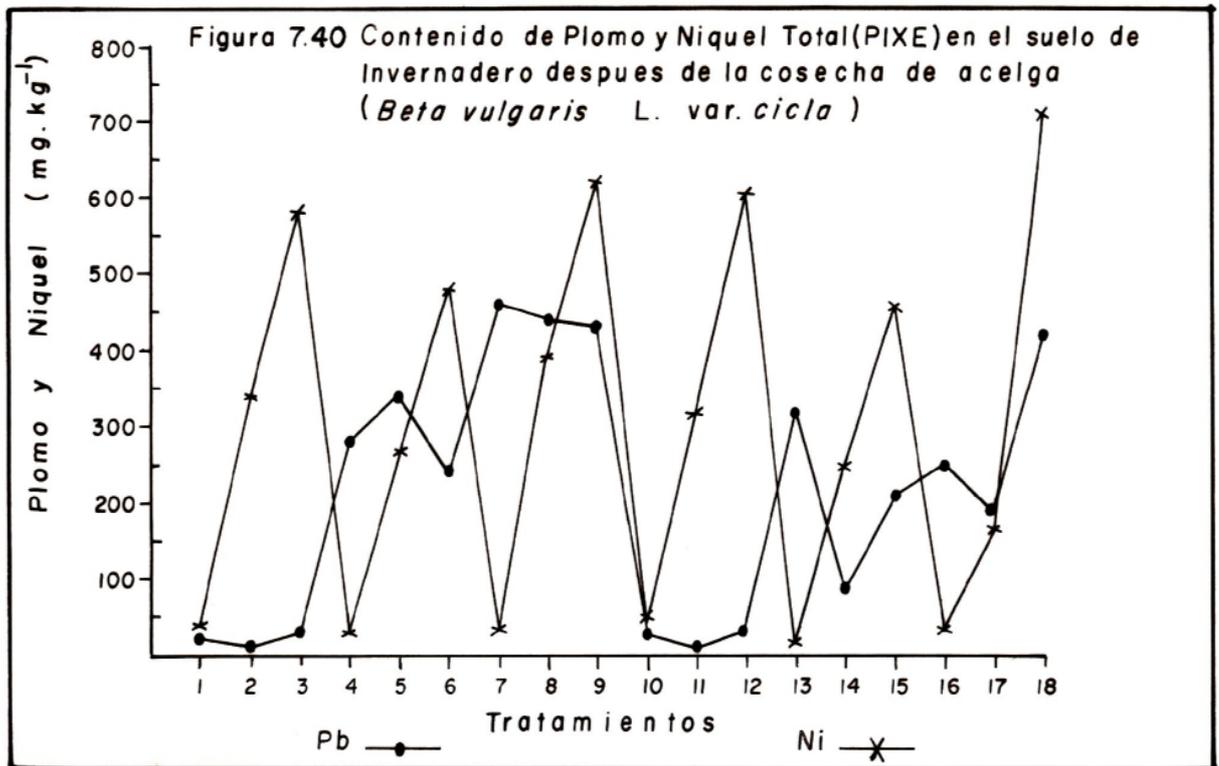


Figura 7.39 Contenido de Cobre, Manganeso y Zinc Total (Pixe) en el suelo de Invernadero despues de la cosecha de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)





El tratamiento 18 (30-1000-1000) tiene diferencias significativas ($p < 0.05$) con el resto de los tratamientos (1 al 17). Los tratamientos 6 (0-500-1000), 7 (0-1000-0), y 8 (0-1000-500) no tienen diferencias significativas ($p < 0.05$).

El contenido de Zn es más alto en el tratamiento 17 (30-1000-500) con un valor de 178.25 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 2 (0-0-500) con un valor de 162.65 mg kg⁻¹; 7 (0-1000-0) con un valor de 112.10 mg kg⁻¹; 5 (0-500-500) con un valor de 109.02 mg kg⁻¹; 3 (0-0-1000) con un valor de 107.90 mg kg⁻¹; 16 (30-1000-0) con un valor de 101.53; 14 (30-500-500) con un valor de 100.53 mg kg⁻¹ y finalmente el valor más bajo de 54.00 mg kg⁻¹ con el tratamiento 10 (30-0-0).

El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones.

El contenido de Pb más alto se encuentra en el tratamiento 7 (0-1000-0) con un valor de 457.00 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 8 (0-1000-500) con un valor de 439.13 mg kg⁻¹; 9 (0-1000-1000) con un valor de 434.48 mg kg⁻¹; 18 (0-1000-500) con un valor de 422.18 mg kg⁻¹; 5 (0-500-500) con un valor de 340.23 mg kg⁻¹; 13 (30-500-0) con un valor de 317.93 mg kg⁻¹ y finalmente con un valor de 11.8 mg kg⁻¹ en el tratamiento 11 (30-0-500).

El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones.

El contenido de Ni más alto se encuentra en el tratamiento 18 (30-1000-1000) con un valor de 709.68 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 9 (0-1000-1000) con un valor de 620.75 mg kg⁻¹, 12 (30-0-1000) con un valor de 607.40 mg kg⁻¹; 3 (0-0-1000) con un valor de 582.18 mg kg⁻¹; 6 (0-500-1000) con un valor de 478.53 mg kg⁻¹; 15 (30-500-1000) con un valor de 455.68 mg kg⁻¹; 8 (0-1000-500) con un valor de 389.10 mg kg⁻¹; 2 (0-0-500) con un valor de 336.70 mg kg⁻¹; 11 (30-0-500) con un valor de 313.08 mg kg⁻¹; y finalmente el valor más bajo es de 18.90 mg kg⁻¹ en el tratamiento 13 (30-500-0).

El análisis de varianza indicó que no existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones.

El contenido de Cr más alto se observó en los tratamientos 18 (30-1000-1000) con un valor de 667.08 mg kg⁻¹; 15 (30-500-1000) con un valor de 376.38 mg kg⁻¹; 17 (30-1000-500) con un valor de 352.63 mg kg⁻¹; 16 (30-1000-0) con un valor de 266.48 mg kg⁻¹ y finalmente los valores más bajos son de 15.98 mg kg⁻¹ en los tratamiento 7 (0-1000-0) y 8.3 mg kg⁻¹ en el tratamiento 1 (0-0-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones; por lo que el análisis de comparaciones múltiples (Tukey) indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas ($p < 0.05$) con los tratamientos 3 al 12 y 14. Los tratamientos 13 (30-500-0), 15 (30-500-1000), 16 (30-1000-0) y 17 (30-1000-500) no tienen diferencias significativas, pero son significativa-mente con el resto de los tratamientos.

El contenido de Cd más alto se observó en los tratamientos 7 (0-1000-0) con un valor de 494.68 mg kg⁻¹; 15 (30-500-1000) con un valor de 437.70 mg kg⁻¹; 4 (0-500-0) con un valor de 378.62 mg kg⁻¹; le siguen los tratamientos 8 (0-1000-500) con un valor de 370.90 mg kg⁻¹; 18 (30-1000-1000) con 298.98 mg kg⁻¹ y finalmente los valores más bajos son de 25.60 mg kg⁻¹ en el tratamiento 10 (30-0-0) y 1 (0-0-0).

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las medias de las concentraciones por lo que el análisis de comparaciones múltiples (prueba de Tukey) indicó que el tratamiento 1 (0-0-0) no tiene diferencias significativas con los tratamientos 2 (0-0-500) y 10 (30-0-0).

Pero si hay diferencias significativas con el resto de los tratamientos.

7.8.1. Discusión de los metales traza y metales pesados totales (PIXE) antes de la siembra y después de la cosecha de *Beta vulgaris* L. var. *cicla*

Los metales traza y metales pesados totales (PIXE) antes de la siembra de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* tuvieron el siguiente orden de concentración: Fe>Ni>Cd>Pb>Mn>Cr>Cu>Zn.

Las concentraciones de Ni en el tratamiento 3(0-0-1000) está por arriba del rango normal reportado por Allaway (1968); los tratamientos 2, 4 al 8 y 9, 11 al 18 están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968); sin embargo en los tratamientos 6, 9, 12 y 18 están por arriba del rango normal reportado por Bowen (1979).

Las concentraciones de Cd sobrepasan el rango normal reportado por Allaway (1968) y Bowen (1979).

Los contenidos de Pb en los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5, 10 al 12 estan dentro del rango normal reportado por Allaway (1968) y los tratamientos 6 al 9 y 13 al 18 sobrepasan el rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984).

Las concentraciones de Mn en todos los tratamientos están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968).

Las concentraciones de Cr en los tratamientos 1, 2, 4 y 8 están por arriba del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984); mientras que los tratamientos 3, 5, 7 y 18 estan dentro del rango potencialmente peligroso. El resto de los tratamientos están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968) y Bowen (1979).

Las concentraciones de Cu en los tratamientos 1 al 7 y del 9 al 17 están dentro del rango normal reportados por Allaway (1968) y los tratamientos 8 y 18 están por arriba del mismo rango reportado por Allaway (1968).

Las concentraciones de Zn en todos los tratamientos están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968) y el tratamiento 5 esta dentro del rango potencialmente peligros reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984).

Los metales traza y metales pesados totales (PIXE) después de la cosecha de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* tuvieron el siguiente orden de concentración: Fe>Ni>Mn>Pb>Cr>Zn>Cd>Cu.

En general se pudo observar que los metales Mn, Cr, Zn y Cu están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968), mientras que el Ni, Pb y Cd están dentro y por arriba del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984).

El Fe es el metal traza dominante.

Le sigue el Ni en el cual se observa que los tratamientos 2, 3, 5, 6, 8, 11, 12, 14, 15, 17 y 18 están por arriba del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984); y los tratamientos 1, 4, 7, 10, 13 y 16 están dentro de los rangos normales reportados por Allaway (1968).

Las concentraciones de Mn en los tratamientos 1, 2, 4, 8, 9, 10, 11, 13, 14 al 18 están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968) y los tratamientos 3, 5, 6, 7 y 12 están dentro del rango normal reportado por Bowen (1979). Por lo tanto las dosis empleadas no afectaron las concentraciones de Mn.

Las concentraciones de Pb en los tratamientos 4, 5, 6, 13, 15, 16 y 17 están dentro del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984); los tratamientos 7, 8, 9, y 18 están por arriba del rango potencialmente peligroso. Los tratamientos 1, 2, 3, 10, 11, 12 y 14 están dentro del rango normal reportados por Allaway (1968) y Bowen (1979).

Las concentraciones de Cr en todos los tratamientos están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968) y los tratamientos 2 y 9 están dentro del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984). Los tratamientos 8, 13 al 18 están por arriba del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984).

Las concentraciones de Zn en todos los tratamientos están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968); sin embargo, en los tratamientos 1 al 8 y del 12 al 18, están dentro del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984).

Las concentraciones de Cd en todos los tratamientos están por arriba del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984).

Las concentraciones de Cu en todos los tratamientos están dentro del rango normal reportado por Allaway (1968); pero los tratamientos 1, 3, 4, 7, 8, 14 al 18 están dentro del rango potencialmente peligroso reportado por Kabata-Pendias y Pendias (1984).

CAPITULO 8

CONCLUSIONES

Los suelos de la zona de estudio, se clasifican como Antrosoles. Presenta un horizonte Térrico (tr) que se desarrolló a través de la adición de abonos o materiales orgánicos por un largo período de tiempo.

El color negro del suelo se debe a la presencia de materia orgánica, principalmente por el elevado contenido de ácidos húmicos.

El drenaje restringido es un factor que frecuentemente contribuye a la salinización de los suelos provocando una baja permeabilidad del suelo.

La salinidad y sodicidad se distribuyen heterogéneamente en los perfiles alcanzando los valores más altos, por lo general en la capa superficial debido a la alta evapotranspiración y a las fluctuaciones del manto freático. Por lo tanto la hipótesis No. 2 se acepta.

El orden de concentración de los cationes y aniones solubles estudiados en los 4 sitios son: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$.

El orden de distribución de los tipos de sales de los 4 sitios estudiados, presenta la siguiente secuencia: $\text{MgSO}_4 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaHCO}_3 > \text{CaSO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4$; y en menor concentración: $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, MgCl_2 y CaCl_2 .

El Tipo de salinidad en los 4 sitios estudiados es sódica-clorhídrica-sulfática.

No hay una relación de concentración de metales DTPA extractables y totales con la profundidad del suelo ya que se comportan de forma heterogénea por su origen antrópico.

Los diferentes grados de movilidad de los metales en el perfil del suelo se deben al transporte como quelatos y al pH alcalino.

El alto contenido de materia orgánica en estos suelos favorece la formación de complejos poco móviles, disminuyendo la captación de los metales traza y metales pesados por las raíces de las plantas.

Existe una correlación positiva entre el contenido de metales pesados disponibles y los factores físicos y químicos como textura, pH, CIC, materia orgánica en la mayoría de los sitios estudiados.

Los metales traza y metales pesados, cationes y aniones solubles e intercambiables tienden a acumularse en la capa superficial.

El orden de concentración de los metales extractables (DTPA) en los 10 perfiles de suelos fue: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cd}$.

El orden de concentración de los metales totales (PIXE) en los 10 perfiles de suelos fue: $\text{Fe} > \text{Cd} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb}$.

El orden de concentración de los metales traza y metales pesados totales en acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*), fue el siguiente: Fe>Zn>Mn>Ni>Cu>Pb>Cr>Cd.

No se observaron problemas de toxicidad de Zn, Mn, Pb, Cr y Cd, esto se debe a que los altos contenidos de materia orgánica forma complejos insolubles con las formas divalente, convirtiéndolas en formas poco o no disponibles para las plantas.

Las bajas concentraciones de metales DTPA extractables se deben a la naturaleza de los sitios de intercambio y al pH alcalino.

La secuencia de extracción de los metales traza y metales pesados con DTPA antes de la siembra de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* fue: Pb>Ni>Fe>Mn>Zn>Cu>Cd>Cr.

La secuencia de extracción de los metales traza y metales pesados con DTPA después de la cosecha de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* fue: Pb>Ni>Fe>Mn>Zn>Cu>Cr>Cd.

La secuencia del contenido de metales traza y metales pesados totales (PIXE) antes de la siembra de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* fue: Fe>Ni>Cd>Pb>Mn>Cr>Cu>Zn.

Los metales traza y metales pesados totales (PIXE) después de la cosecha de *Beta vulgaris* L. var. *cicla* fue: Fe>Ni>Mn>Pb>Cr>Zn>Cd>Cu.

La aplicación de Ni en forma de NiSO₄·6H₂O provocó fitotoxicidad en *Beta vulgaris* L. var. *cicla*, esto se debe a su gran movilidad dentro de la planta.

La aplicación de Pb en forma de Pb(NO₃)₂ no provocó fitotoxicidad en *Beta vulgaris* L. var. *cicla*.

La biomasa total, peso seco de follaje y raíz, longitud total de planta, número de hojas y ancho de las hojas fueron más altos al aplicar la composta de *Casuarina equisetifolia* L., junto con los metales Pb y Ni.

Los NO₃⁻ contenidos en el Pb(NO₃)₂ y de la composta permitieron un desarrollo óptimo reflejado en un vigoroso crecimiento vegetativo y un intenso color verde en *Beta vulgaris* L. var. *cicla*.

La movilidad de los iones en el suelo, incluyendo los cationes y aniones solubles, así como la de los metales traza y metales pesados, depende de la saturación de humedad, la velocidad de desplazamiento del agua en el suelo, el potencial redox, el pH, la interacción con otros constituyentes de la solución y propiedades físicas y químicas del suelo como son textura, la capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica por mencionar algunas.

Es conveniente realizar estudios de metales pesados en las plantas, especialmente en cultivos hortícolas como lechuga, acelga, brócol, así como en maíz y frijol que son principalmente los cultivos básicos de la zona.

CAPITULO 9

LITERATURA CITADA

- Acevedo L.S.** 1972. Monografía histórica de Xochimilco. DDF. Méx. pp: 20-25.
- Aceves N.E.** 1979. Los terrenos ensalitrados y métodos para su recuperación. UACH. Texcoco. Edo. de México. pp: 3-25; 45-203.
- Aceves N.E.** 1979. El ensalitrado de los suelos bajo riego. Colegio de Postgraduados. Chapingo. México. 382 p.
- Aguilera H.N.** 1989. Tratado de Edafología de México. Tomo I. Depto. de Biología. Fac. de Ciencias. UNAM. México. 222 p.
- Aguilar J.** 1982. Las chinampas: una técnica agrícola muy productiva. Ed. Cántaro. Arbol Editorial. INEA México. pp: 25-40.
- Alexander M.** 1980. Introducción a la Microbiología del Suelo. AGT: Editor. México. 491 p.
- Allaway W.H.** 1968. Agronomic controls environmental cycling of trace elements. Adv. Agron. 20:235-274.
- Alloway B.J.** 1992. Heavy Metals in Soils. John Wiley & Sons. Inc. New York. 339 p.
- Anderson A.J.; Meyer D.R., and Mayer F.K.** 1973. Heavy meta toxicities: levels of nickel, cobalt and chromium in the soil and plants associated with visual symptoms and variation in growth of an oat crop. Aust. J. Agric. Res. 24:557-561.
- Andrade, E.** 1998. IBA analysis of a possible therapeutic ancient tooth inlay. Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. Vol. 138:908-912.
- Antipov-Karataev, I.N.** 1967. Reclamation of solonetz soils in the USSR. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, Israel.
- Aragües R. y Cerdá A.** 1998. Salinidad de aguas y suelos en la agricultura de regadío. En Jiménez R. y Lamo de Espinosa J. (Ed.): Agricultura sostenible. Agrofuturo, Life y Ed. Mundi-Prensa. Madrid. pp: 249-274.
- Asghar M. and Kanehiro Y.** 1981. The fate of applied iron and manganese in an Oxisol and Ultisol from Hawaii. Soil Science. 131:53-55.
- Aylett B.J.** 1979. The chemistry, Biochemistry and Biology of Cadmium. Ed. Webb, M. Elsevier. Amsterdam. pp: 1-43.
- Avilés H.G.V.** 2000. Identificación de especies vegetales con capacidad para remover metales pesados en suelos contaminados. Tesis Lic. UACH. Depto. de Suelos. Ing. En Planeación y manejo de los Recursos Naturales Renovables. 71 p.

- Balderas P. M.A.** 2001. Suelos agrícolas contaminados por metales pesados provenientes de depósitos de vehículos de desecho. Tesis. Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo. Texcoco, Edo. de México. 145 p.
- Balanzario A.** 1976. Contaminación de las aguas en los canales de Xochimilco. Tesis Profesional. Fac. de Filosofía y Letras. 120 p.
- Bartlett R.J.** and **James B.R.** 1988. *In: Chromium in the Natural and Human Environment.* Nriagu J.O. and Nieboer E. (Eds). John Wiley, New York. Chapter. 10.
- Bartels J.M.** (ed). 1996. Methods of Soil Analysis. Chemical Methods. Methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison Wis. Num. 5. Pte. 3. 1390 p.
- Basta N.T.; Pantone D.J.** and **Tabatabai M.A.** 1993. Plant analysis of heavy metal adsorption by soil. *Agron. J.* 85:1025-1057.
- Bastida A.** y **Maciel I.** 1986. Estudio Físico y Económico Social de Xochimilco. Tesis Maestría en Ciencias. Fac. Filosofía y Letras. UNAM. México. 20-35.
- Basurto P. F.** 1986. Efecto de 2 mejoradores (yeso y porqueraza) y caracterización de suelos salino-sódicos de la chinampa de Xochimilco, D.F. Seminario de Investigación de Edafología Avanzada. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Baver, C.D.** y **Gardner W.H.** 1973. Física de suelos. Unión Tipográfica. Editorial Hispanoamericana. 429 p.
- Bernstein L.; François L.E.,** and **Clark R.A.** 1974. Interactive effects of salinity and fertility on yields of grains and vegetables. *Agronomy J.* 66:412-421.
- Berrow M.L.** and **Burridge J.C.** 1979. Sources and distribution of trace elements in soils and related crops. *In: Proc. Int. Conf. On management and control of heavy metals in the environment.* CEP. Consultants Ltd. Edinburgh, UK. 304 p.
- Bingham F.T.; Mahler R.J.** y **Sposito G.** 1979. Effect of irrigation water composition on exchangeable sodium status of a field soil. *Soil Science.* 127(4):248-252.
- Bohn L.H., McNeal I.B.** and **O'connor A.L.** 1993. Química del suelo. Limusa. México. pp: 319-357.
- Bloomfield C.** 1981. The translocation of metals in soils. *In: The chemistry of soil processes.* Greenland D.J. and Hayes M.H.B. (Eds.) John Wiley & Sons. New York 468 p.
- Boekhold A.E.** and **Van der Zee S.E.A.T.M.** 1992. Significance of soil chemical heterogeneity for spatial behavior of Cadmium in field soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:747-754.
- Bourg A.C.M.** 1995. Speciation of heavy metals in soils and groundwater and implications for their natural provoked movility. *In: Heavy metals problems and solutions.* Salomons W.; Förstner U. and Nader P. (Eds.). Germany. pp: 19-31.
- Bourrelier P.H.** and **Berthelin J.** 1998. Contamination des sols par les elements en traces: les risques et leur gestion. Lavoisier Tecdoc. Rapport No. 42. 440 p.
- Bouyoucos G.W.** 1963. Directions for marking mechanical analysis of soil by hidrometer method. *Soil Sci.* 42:25-35.

- Bowen H.J.M.** 1979. Environmental chemistry of elements. Academic Press, London.
- Bower C.A.** and **Huss R.B.** 1948. Rapid conductometric method for estimating gypsum in soils. *Soil Sci.* 66:199-204.
- Bresler E.; McNeal B.L.** and **Carter D.L.** 1982. Saline and sodic soils. Springer-Verlag, Berlín.
- Brooks R.R.** 1977. Copper and Cobalt uptake by Hausmanias-trum species. *Plant and Soil.* 48. 545-553.
- Cajuste J.L.; Carrillo R.;** and **Laird R.J.** 1991. The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. *Water, Air and Soil Pollution.* 57-58: 763-771.
- Cajuste J.L.** and **Reggie L.L.** 2000. The relationship between the phytoavailability and the extractability of heavy metals in contaminated soils. *In: Environmental Restoration of Metals-Contaminated soils.* Iskandar I.K. (Ed.) Lewis Publishers. Boca Ratón, Florida. pp: 189-198.
- Carrillo G.R.; Cajuste J.L.** y **Hernández H.** 1992. Acumulación de metales pesados en un suelo regado con aguas residuales. *Terra.* 10 (2):166-173.
- Carrillo R.** y **Cajuste J.L.** 1992. Heavy metals in soils and alfalfa (*Medicago sativa* L.) irrigated with three sources of wastewater. *Journal of Environmental Science and Health.* A27(7): 1771-1783.
- Carter D.L.** 1975. Problems of salinity in agriculture. *In: A. Poljakoff-Mayber y J. Gale* (eds). *Plant in saline environment.* Springer-Verlag. Berlin.
- Castillo A.G.I.** 1993. Rehabilitación de suelos de chinampa a nivel de invernadero paraje Texhuilo-Xochimilco, D.F. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 88 p.
- Cary E.E.; Alloway W.H.** and **Olsen O.E.** 1977. Control of Chromium concentrations in food plants. I. Absorption and translocations of chromium in plants. II. Chemistry of chromium in soils and its availability to plants. *J. Agric. Food Chem.* 25. I. 300-314; II. 305-309.
- Cataldo D.A.; Gartan T.R.** and **Wildung R.E.** 1978. Nickel in plants. *Plant Physiol.* 62. I. 560-563. II. 566-570.
- Celada T. J. E.** 1993. Efecto de la materia orgánica en suelos de chinampa de Xochimilco, México, D.F. Tesis de Maestría en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias. UNAM. 151 p.
- Cervantes B.J.** 1983. Génesis, morfología y clasificación de los suelos de la Cuenca de México. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. UNAM.
- Cíntora G. M.J.S y Ortega M.Y.M.** 2005. Boro, Fósforo e índices de salinidad en las aguas residuales para riego agrícola en el valle del Mezquital. Hidalgo..FES, Zaragoza. UNAM. 106 p.
- Coe M.** 1964. The chinampas of Mexico. *Scientific American,* 260: 90-96.
- Colombo L.; Mangione D.; Bellicioni L.** and **Figliolia A.** 1998. Soil profile distribution of heavy metals in soil amended with sewage sludge for eight years. *Agricultura Mediterránea.* Vol. 128 (4): 273-283.
- Cottenie A.** 1980. Los análisis de suelos y plantas como base para formular recomendaciones sobre fertilizantes. *Boletín de suelos de la FAO* 38/2. FAO, Roma Italia.
- Cox G.W.** and **Atkiins M.D.** 1979. Agricultural ecology subsistence agriculture. *Freeman and Co.* USA.; (5): III-138.

- Chaney R.L.** 1983. potential effects of waste constituents on the food chain. *In*: J.F. Parr *et al.*, (eds) Land treatment of hazaous wastes. Noyers Data Corp. Dark Ridge, N.Y. pp: 152-240.
- Chapa S.** 1957. San Gregorio Atlapulco, Xochimilco. Talleres.
- Chapman H.D. y Pratt P.F.** 1973. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Ed. Trillas. México. 195 p.
- Chávez C. M.A.** 2000. Caracterización física y química de algunas calicatas de San Nicolás Tetelco en la Delegación Tláhuac y Xochimilco, D.F. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 63 p.
- Cheng K.L. and Bray R. N.** 1951. Determination of calcium and magnesium in soil and plant material. *Soil Sci.* 72:449-458.
- Davis R.D.; Beckett P.H.T. and Wollan E.** 1978. Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. *Plant Soil.* 49. 395-403.
- De Cserna Z.; de la Fuente D.M.; Palacios N.M.; Triay L.; Mitre S.L.M. y Mota P.R.,** 1988. Estructura geológica, gravimétrica, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México: México, UNAM., Instituto de Geología, Boletín 104. 71 p.
- DGCOH,** 2001. Informe mensual de gasto de operación de las plantas de tratamiento de agua residual. Unidad Departamental de Tratamiento y Rehuso. DDF. 3 p.
- DGCOH,** 2000. Informe anual del contenido de sólidos, metales alcalinos y alcalino térreos, metales pesados del agua de la planta de tratamiento de agua residual Cerro de la Estrella. Subdirección de Desarrollo Tecnológico. DDF. 3 p.
- Dhillon S.K.; Sidhu P.S. and Sinha M.K.** 1981. Copper adsorption by alkaline soils. *J. Soil Sci.* 32: 571-578.
- Davis R.D., Beckett P.H.T and Wollan E.** 1978. Critical level of twenty potential toxic elements in young spring barley. *Plant Soil.* 49: 395-399.
- Diaz A.I.** 1999. Efectos del Cadmio, Niquel y Plomo en Procesos fisiológicos del trigo (*Triticum aestivum* L.) Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo Texcoco, Edo. de México. 207 p.
- Diehl R.; Mateo B.J.M. y Urbano T.P.** 1978. Fitotecnia General. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 814 p.
- Dixon J.B. and Weed S.B. (Co-Editors).** 1989. Minerals in soil environments. Number 1 in the Soil Scienzen Society of America Book Series. SSSA. Madison. USA. pp: 246 –324.
- Donahue R.L.; Miller R.W. y Shick L.J.C.** 1981. Introducción a los suelos y al crecimiento de las plantas. Prentice/Hall International. México. 624 p.
- Duchaufour P.** 1978. Manual de Edafología. Toray-Masson Barcelona. pp: 420-423.
- Escobedo F.M.R.** 1987. Estudio edafológico de chinampas de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 78 p.
- Estévez J.; Andrade L.; Marcet P. y Montero J.M.** 1998. La influencia de las propiedades del suelo en la fijación y movilidad de Zn y Cd. *Edafología.* 5: 19-27.

- FAO-UNESCO**, 1990. Mapa Mundial de Suelos. Informe sobre Recursos Mundiales de Suelos. Preparada por la Organización de la Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. 142 p.
- Farago M.E. (Ed.)**. 1994. Plants and the chemical Elements. Biochemistry, uptake, tolerance and toxicity. VCH. Weinheim. 31-66; 88-105; 150-177.
- Fassbender H.W.** 1984. Química de suelos. IICA de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 318 p.
- Fernández Q.M.C.** 1988. Manejo y recuperación de suelos salino-sódicos en chinampas de Xochimilco, D.F. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. pp: 9-25.
- Flores T.F.J., Muñoz S.E.M. y Morqueño B.O.** 1999. Absorción de Cromo y Plomo por alfalfa y pasto ovillo. *Agrociencias*. 33: 381-388.
- Flores D.L.** 1987. Algunos nutrientes asimilables en diferentes suelos de México. Tesis de Maestría en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias. UNAM. pp: 55-58.
- Förstner U.** 1995. Contaminated aquatic sediments and waste sites: geochemical engineering solutions. In: Salomon W., Förstner U. and Mader P. Heavy metals. Problems and solutions. Springer Germany. pp: 237-256.
- Fortun C. y López-Fando C.** 1983. Influencia del ácido húmico sobre la nutrición mineral y el desarrollo radicular de plantas de maíz cultivadas en soluciones nutritivas normales y carentes de Fe y Mn. *Anales de Edafología y Agrobiología*. 26: 335-349.
- Fuentes R.E.** 2001. Estudio comparativo de suelos de chinampa contaminados por sales y/o sodio en Xochimilco, Mixquic y Tláhuac. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias, UNAM. 120 p.
- Galicia P. Ma del S.** 1990. Efecto de un mejorador mineral en suelos de chinampa de Tláhuac, D.F., cultivando *Brassica oleracea* variedad *Cauliflora*. Tesis Maestría en Ciencias. UNAM. pp: 1-35.
- García E.** 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República). Instituto de Geografía de la UNAM. México. pp: 80-85.
- García G.I.E.** 1954. Estudio geográfico de la Delegación de Tláhuac, D.F., Tesis de Maestría en Geografía. Fac. de Filosofía y Letras, UNAM. 100 p.
- García C. N.; Galicia P.S.; Aguilera H. y Reyes O. L.** 1994. Organic matter and humic substances contents in chinampa soils from Xochimilco-Tláhuac Areas (Mexico). *In: 15 th World Congress of Soils Science*. Acapulco. México. Vol. 3: Symposium ID-12. pp: 368-383.
- Gutiérrez R.M.; Siebe Ch. and Sommer I.** 1995. Effects of land application of wastewater from Mexico City on soil fertility and heavy metal accumulation a bibliographical review. *Environ. Rev.* 3:318-330.
- Hem J.D.** 1965. Reduction of manganese dioxide by organic solvents. U.S. Geol. Survey Water Supply Paper. 28 p.
- Huez L.M.A.** 1985. Características de algunas propiedades física-químicas de los suelos y espesores subyacentes del Predio Montecillo. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

- Hillel D.** 1998. Environmental soil physics. Academic press. San Diego. 771 p.
- Ibañez H.A.** 1993. Efecto de algunos mejoradores biológicos nuevos en suelos de chinampa de Tláhuac D.F., con problemas de sodicidad y salinidad en un cultivo de *Spinacia oleracea* L. Variedad *híbrido cascade*. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 114 p.
- INEGI 1997.** Cuaderno Estadístico Delegacional. Xochimilco, D.F. INEGI. México.
- INEGI 1997.** Cuaderno Estadístico Delegacional. Tláhuac, D.F. INEGI. México.
- Jackson L.M.** 1982. Análisis químico de suelos. Ed. Omega. Barcelona. España. pp: 91-98, 166-170, 190-197 y 282-294.
- Jaffrey D. & Garrett. W.E.** 1974. Burma's leg rowers and floating farms. Nat. Geog. 146 (16): 826-845.
- Jarvis S.C.** 1984. The forms of occurrence of manganese in some acidic soils. Jour. Soil Sci. 35:421-429.
- Johaston W.R. and Proctor J.** 1977. Metal concentrations in plants and soils from two British serpentine sites. Plant and Soil. 46, 275-283.
- Jones L. H.P., Jarvis S.C. and Cowling D.W.** 1973. Lead uptake from soils by perennial regrass and its relation to the supply element (sulphur). Plant Soil. Pp:381, 605.
- Kabata-Pendias and Pendias H.** 1984 trace elements in soils and plants. Vol.1. CRC. Press., Inc., Boca Ratón, Florida, USA.
- Kabata-Pendias A. and Pendias H.** 2001. Trace elements in soil and plants. Edition CRC. Press. 365 p.
- Khalid B.Y. and Timsley J.** 1980. Some effects of nickel toxicity on rye grass. Plant Soil. 55: 139-145.
- Kovda V.A.; Berg C.V. and Hagan R.M.** 1967. International source-book on irrigation and drainage of arid lands in relation to salinity and alkalinity. FAO-UNESCO. 663 p.
- Klute A.** (ed). 1986. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, Wis. No. 9. Pte. 1. 1118 p.
- Kramer P.J.** 1974. Relaciones hídricas de suelos y plantas. Una síntesis moderna. Mc Graw Hill. INC. México. 538 p.
- Labrador M.J.** 1996. La materia orgánica en los agroecosistemas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Mundi-Prensa. 174 p.
- Leicht H.** 1937. Chinampas y almácigos flotantes. In: Anales del Instituto de Biología. UNAM. Vol. 5. 3: 375-378.
- Levy G.J.; Shainberg I. and Miller W.P.** 1998. Physical properties of sodic soils. In: Sodic soil. Distribution, properties, management and environmental consequences. Sumer M.E. and Naidu R. (eds). Oxford University Press. New York. pp: 77-94.
- Lindsay W.L. and Norvell W.A.** 1978. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Sci. Soc. Am. J. 42: 421-428.
- López R.G.F.** 1988. Sistema agrícola de chinampas. Perspectiva agroecológica. Cuadernos Universitarios. Serie Agronómica. UACH. Dirección de Difusión Cultural. Texcoco, México. No. 15. pp: 33-70.

- López R.E.** 1981. Geología de México. Tomo II. 2ª. Edición. Instituto de Geología. UNAM. México. pp: 30-34.
- Lugo De la F. J.** 1984. Suelos salinos del ejido Xochimilco. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. pp: 6-20.
- Mainardi F.F.** 1992. Manual práctico del Horticultor Moderno. El huerto, como, donde, cuando. Ed. De Vecchi, S.A. pp: 170-193.
- Maroto B.J.V.** 1990. Elementos de Horticultura General. Especialmente aplicado al cultivo de plantas de consistencia herbácea. Mundi-Prensa. Madrid. 343 p.
- Maroto B.J.V.** 1995. Horticultura Herbácea Especial. Mundi-Prensa. Madrid. pp: 268-271.
- Martín del Pozo A.L.** 1985. La formación geológica en el Valle de México. Radio UNAM. Dirección General de Proyectos Académicos. México.
- Mascareño C.F.** 1974. Estudio preliminar sobre contaminación de los suelos y de la producción agrícola en el Distrito de Riego 03 por el uso de aguas negras de la Ciudad de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Especialidad de Suelos, Chapingo, México. 114 p.
- Mashhady A.S.** and **Rowel D.L.** 1978: Soil alkalinity II. The effects of Na₂CO₃ on iron and manganese supply to tomatoes. Journal of Soil Science 29: 367-372.
- Maxwell J.A.;** **Teesdale W.J.** and **Campbell J.L.** 1995. The Guelph PIXE software package II. Nucl. Instr. and Meth. In Phys. Res. B.
- Mc Bride** 1989. Reactions controlling heavy metal solubility in soils. Advances in soil Science, 10.
- McLaren R.G.;** **Lawson D.W.** and **Swift R.S.** 1986. Sorption and desorption of cobalt by soils and soil components. Journal of Soil Science. 37:413-426.
- McLaren R.G.;** **Swift R.S.** and **Williams J.G.** 1981. Adsorption of copper by soil materials at low equilibrium solution concentrations. Journal of Soil Science. 32:247-256.
- McNichol R.D.** and **Beckett P.H.T.** 1985. Plant and soil. pp: 107-129
- Medina V. J.** 1993. Estudio edafológico de una chinampa en San Luis Tlaxialtemalco, Xochimilco y terrenos colindantes con la Delegación Tláhuac. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 127 p.
- Mendoza R.M.** 1961. Estudio geográfico de la Delegación Xochimilco. Tesis de Maestría. Fac. Filosofía y Letras. UNAM. México.
- Mercado S.I.** 1993. Respuesta de un suelo salino sódico de San Luis Tlaxialtemalco, D.F., a la aplicación de mejoradores biológico, químico e hidrotécnico a nivel de invernadero. Tesis Maestría en Ciencias (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM. 120 p.
- Messiaen C.M.** 1979. Las hortalizas técnicas agrícolas y producciones tropicales. Blume distribuidora. México. pp: 296-300.
- Miller W.P.** and **McFee W.W.** 1983. Distribution of cadmium, zinc, copper and lead in soils of industrial north western Indiana. J. Environmental Qual. 12(1):29-33.

- Miranda J.** 2000. Técnicas analíticas de origen nuclear: un curso introductorio. 2ª Ed. Instituto de Física. Universidad Nacional Autónoma de México. 81 p.
- Mooser F.** 1961. Informe sobre la geología de la Cuenca del valle de México y zonas colindantes. SRH. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México. pp: 3-148
- Morquecho C.A.** 1997. Distribución de metales pesados en el sistema sedimento-suelo de la Presa "José Antonio Alzate", Estado de México. Tesis de Licenciatura en Biología. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma del Estado de México. 56 p.
- Mortvedt J.J.; Giordano M.P. y Lindsay W.L.** 1983. Micronutrientes en agricultura. AGT. Editor. México. 742 p.
- Munsell, Soil Chart.** 1975. Edition Munsell Color Co. Baltimore Maryland.
- Novelo R.A. y Gallegos M.M.** 1988. Estudio de la flora y vegetación acuática relacionada con el sistema de chinampas en el sureste del Valle de México. *Biótica*. 13 (2):121-129.
- Nriago J.O.** 1978. The biogeochemistry of lead in the environment. Elsevier, North Holland, Amsterdam.
- Ortega E. M.** 1993. Causas del ensalitramiento y su efecto sobre los suelos Tomo I y II. Colegio de Posgraduados. Centro de Hidrociencias. Area de suelos salinos y sódicos. Montecillo, México. pp: 4-56.
- Ortiz O.M.** 1991. Determinación de los contenidos de sales y sodio intercambiable de los suelos. Depto. de suelos. Manejo de los suelos y aguas. UACH. México. 36 p.
- Ortiz O.M.** 1992. Distribución y extensión de los suelos afectados por sales en México y el mundo. UACH. México. 36 p.
- Palerm A.** 1972. Agricultura y sociedad en Mesoamérica. SEP. Setentas. Ed. Diana. No. 55. México.
- Palerm A. y Wolf E.** 1972. Agricultura y civilización en Mesoamérica. SEP-Setentas. No. 32. México.
- Paul E.A. and Douglas A. Mc. (Eds).** 1975. Soil Biochemistry. Vol. 4. Marcel Dekker Inc. New York. 277 p.
- Pérez C.L.; Moreno G.A.M. y González P.J.** 1995. Influencia de la fracción arcilla y arena en el contenido y disponibilidad de metales pesados en suelos. *Edafología*. Sociedad Española de la Ciencia del suelo. 1: 83-89.
- Petrovic M.; Kastelan-Macan M. and Horvat A.J.M.** 1999. Interactive sorption of metal ions and humic acids on to mineral particles. *Water, Air and Soil pollution*. 111 (1-4): 41-56.
- Petruzzelli G.; Guidi G. and Lumbrano L.** 1978. Organic matter as an influencing factor on copper and cadmium adsorption by soils. *Water, Air and Soil pollution*. 9:263-269.
- Phipps D.A.** 1981. Chemistry and biochemistry of trace metals in biological systems. *In: Effect of heavy metal pollution on plants*. Vol. I. Effects of trace metals on plant function. (Ed). N.W. Lepp. Applied Science Publishers. London. UK pp: 1-9.
- Piccolo A. and Celano G.** 1992. The total content of trace elements in some entisol profiles of a hydromorphic soil system. *Agrochimica*. 36: 233-244.

- Pizarro F. 1978.** Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Agrícola Española. Madrid, España. 513 p.
- Porta J. y Herrero J. 1996.** Vulnerability of soil under irrigation. In Pereira L.S. (ed.): sustainability of irrigated agriculture. Kluwer Acad. Publ. pp: 85-96.
- Porta C.J.; López-Acevedo R.M. y Roquero C. 1999.** Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. México. pp: 665-702.
- Quiroz H.L.C. 1984.** Descripción de la situación de los árboles y arbustos de alineación de las Delegaciones de Milpa Alta, Tlahúac, Xochimilco, D.F. Tesis de Licenciatura (Biología). UNAM. México.
- Ramos B.R. y Aguilera H.N. 1993.** Empleo de un mejorador químico (sulfato ferroso) y fertilizantes en un suelo de chinampa con problemas de salinidad y sodicidad en Xochimilco. Resúmenes del Primer Seminario Internacional de Investigadores de Xochimilco. México. D.F.
- Ramos B.R.; Cajuste J.L.; Flores R.D. y García C.N.E. 2001.** Metales pesados, sales y sodio en suelos de chinampa en México. Agrociencia. 35:385-395.
- Ramos R.; García N.E.; Andrade E.; Solís C.; Murillo G. and Rocha M.F. 2002.** Multielemental análisis by PIXE of chinampa soils in Mexico city. *In: International Journal of PIXE.* (Ed). K. Ishii; T.A. Cahill; K.G. Malmqvist and M. Kasahara. World Scientific. Singapore. 12 (3 & 4): 237-243.
- Reitemeier R.F. 1943.** Semimicroanalysis of saline soil solution. *Indus. And Engin. Chem., Analyt. Ed.* 15:393-402.
- Reyes J.I. 1985.** Efecto de mejoradores químicos en suelos sódicos salinos del ejido Ciénega Grande, Xochimilco, D.F., a nivel de invernadero. Tesis de Maestría. Fac. de Ciencias. UNAM: México. pp: 48-63.
- Reyes O.A.L.; Aguilera H.N. y García C.N. 1997.** Caracterización de complejos arcilla-humus y su efecto en el desarrollo de cultivos florícolas (*Antirrhinum majus* L.). *Edafología.* 3(1): 161-169.
- Richards L.A. (Ed.). 1985.** Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América. Ed. Limusa. México. pp: 1-8.
- Rojas R.T. 1983.** Agricultura chinampera. Compilación histórica. Cuadernos universitarios. Serie agronomía. No. 7. UACH. México.
- Rojas R.T. 1990.** Chinampas un Legado. *Rev. México Indígena* (6): 42-45.
- Saeki K.; Orazaki M. and Kubota M. 1993.** Heavy metal in a semienclosed hypereutrophic system: lake Tega numa. Japan. *Water Air and Soil pollution.* 69: 79-91.
- Sanders W.T. 1957.** Tierra y agua. A study of the ecological factors in the development of mesoamerican civilizations. Ph. D. Dissertation. Department of Anthropology. Harvard University, USA.
- SantaMaría M. 1912.** Las chinampas del Distrito Federal. La agricultura chinampera. Compilación histórica. UACH. Edo. de México. pp: 46-60.
- SARH 1984.** Jerarquización de los principales distritos afectados por sales. México, D.F.

- Seoáñez C.M.; Chacón A.A.J.; Gutiérrez de Ojesto A. y Angulo A.I.** 1999. Contaminación del suelo: Estudios tratamiento y gestión. Mundi-Prensa. Madrid. pp: 167-181.
- SICS-ISRIC-FAO**, 1999. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Informe sobre recursos mundiales de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. 90 p.
- Sillanpää M.** 1976. Los oligoelementos en los suelos y en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación. Boletín de Suelos. No. 17. 71p.
- Sotelo S. A. y Aguilera H.N.** 1993. Efecto de dos mejoradores biológicos en un suelo salino-sódico de la Delegación de Tláhuac, D.F. Resúmenes del Primer Seminario Internacional de Investigadores de Xochimilco, México, D.F.
- Sposito G. and Page A.L.** 1984. Circulation of metal ions in the environment. Metal Ions in Biological Systems. Vol. 18. (Ed). Sigel H.M.D. New York. pp: 287-320.
- Sumner M.E.; Rengasamy P. and Naidu R.** 1998. Sodic Soil: A Reappraisal. In: Sodic Soil. Distribution, properties, management and environmental consequences. Summer M. E. and Naidu R (eds). Oxford University Press. New York. pp: 3-17.
- Szabolcs I.** 1989. Salt-Affected-Soil. Boca Ratón, Florida.
- Tamaríz F.J.V.** 1996. Contaminación de suelos agrícolas por metales pesados en el Municipio de Atlixco, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias (Edafología). Fac. de Ciencias, UNAM. pp: 61-82.
- Tamhane R.V.; Motiramani D.P. y Bali Y.P.** 1978. Suelos su química y fertilidad en zonas tropicales. Ed. Diana. México. 483 p.
- Tanji K.K.** (ed). 1990. Agricultural salinity assesment and management. American Society of Civil Engineers. New York.
- Tan K.H.** 1998.principles of soil chemistry. Marcel Dekker, Inc. New York. pp: 431-456.
- Tapia V.G. y López B.J.** 2002. Mapeo geomorfológico analítico de la porción central de la Cuenca de México: unidades morfogenéticas a escala 1:100 000. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 19 (1): 50-65.
- Tapia V.G. y López B.J.** 1998. Cartografía geomorfológica morfogenética a escala 1:100 000 de la vertiente tributaria oriental del ex Lago de Texcoco. In Alvarez S.A.; Ferrari L., Nieto S.A.F.; Ortega R.M.A. (eds). Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Libro de Resúmenes: México. Sociedad Geológica Mexicana, Instituto Nacional de Geoquímica, Sociedad Mexicana de Geomorfología, Sociedad Mexicana de Mineralogía, Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros. p. 49.
- Thurman E.M.** 1986. Organic geochemistry of natural waters. Nijhoff/Junk. Publishers Dordrecht.
- Tiffin L.O.** 1977. The form and distribution of metals in plants: an overview in Proc. Hanford Life Sciences Symp. U.S. Department of Energy. Symposium Series. Washington, D.C. 315 p.
- Tiller K.G.** 1989. Heavy metals in soils and their environmental significance. Advances in Soil Science. Vol. 9: 13-142.

- Tisdale S.L.** y **Nelson W.L.** 1982. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Unión Tipográfica Editorial. México. pp:97-101; 138-203.
- Trejo C.A.** 1984 Estudios edafológicos del ejido Grande Xochimilco. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. 111 p.
- Tserling V. V.** 1969. Diagnosis of nutrition of plants. Agrochemical methods in study of soils. Dokuchaev Inst. of Soil Sci. Academy of Sciences of the URSS. pp: 706-709.
- Ure A.M.** and **Berrow M.L.** 1982. The elemental constituents of soils. Environmental Chemistry. Vol. 2. Royal Society of Chemistry, London.
- Valdez M.G.** 1995. Recuperación de un suelo salino sódico en una chinampa de la Laguna del Toro, Xochimilco, D.F. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM 101 p.
- Vallejo A.C.** 1992. Contaminación de suelos de algunas calcatas de San Gregorio Atlapulco y San Luís Tlaxiátemalco Xochimilco, D.F. Tesis Lic. Biología. Facultad de Ciencias. UNAM. pp: 5-11; 16-24; 52-63.
- Vallejo A.C.** y **Aguilera H.N.** 1993. Diagnóstico de los Indices de contaminación de calcatas de suelos de chinampa y posibilidades de rehabilitación de la zona lacustre de Xochimilco. Resúmenes del Primer Seminario Internacional de Investigadores de Xochimilco. México, D.F.
- Varadez L.A.** 1994. Producción de hortalizas. UTEHA. México. pp: 127-141.
- Vazquez A.A.** y **Bautista A.N.** 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. UACH. Depto. de Suelos. 29 p.
- Vázquez A.A.** 1999. Evaluación del riesgo a la contaminación con metales pesados en la región del Valle del Mezquital, Hgo. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo Texcoco Edo. de México. 132 p.
- Vázquez A. A.; J. Cajuste L.; Siebe G.C.; Alcántar G.G.** y **De la Isla de Baver L.** 2001. Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Agrociencia. 35(3): 267-274.
- Venegas C.R.** (1978). Las chinampas de Míxquic. Tesis Facultad de Ciencias. UNAM. 70 p.
- Viets Jr. F.G.** and **Lindsay W.L.** 1973. Testing soils for zinc, copper, manganese and iron. In soil testing and plants analysis. (Eds). Walsh and Beaton SSSA. Madison Wisconsin USA.
- Villafañe R.** 1998. Diseño agronómico del riego. Depto. de Ing. Agrícola. Fac. de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay. 147 p.
- Walkley A.** and **Black I.A.** 1947. An examination of the degtareff method for determining soil organic and a proposed modification of chromic acid titration method. Soil Sci. 37: 29-38.
- Welch R.M.** 1979. The biological significance of nickel. Paper presented al Int. Symp. Trace Element Stress in plants. The Angeles. No. 6. pp: 36.
- West R.C.** y **Armillas P.** 1950. Las chinampas de México. Poesía y realidad de los jardines flotantes. Cuadernos Americanos 9(2): 165-182.

- Wiersma D.** and **Van Goor B.J.** 1979. Chemical forms of *nickel* and *cobalt* in phloem of *Ricinus communis*. *Physiol. Plant.* 45: 440-448.
- Whifting L.D.** and **Janitzky P.** 1963. Mechanisms of formation of sodium carbonate in soils. *Journal of Soil Science.* Vol. 14. (2):323-334.
- Zimdahl R.L.** and **Koepe D. E.** 1977. Uptake by plants. In: *Lead in the environment.* Boggess. W.R. and Wixson B. G. (Eds.). Report NSF, National Science Foundation, Washington D.C. 99 p.

APÉNDICE A

Cuadro A1. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-1 Xochimilco, D.F.

Variables	Prof.	H	DA	DR	PORO.	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI
Prof.		0.60	-0.55			0.75	-0.73	0.64		-0.76	-0.77	-0.72	-0.61	-0.73	-0.51	-0.52	-0.87	-0.75	
H	0.60					0.77				-0.58	-0.57						-0.72		
DA	0.55												0.58	0.53					
DR					0.97														
PORO.																			
ARENA	0.75	0.77					0.73	0.55		-0.75	-0.73						-0.78	-0.65	
LIMO	-0.73						-0.73	-0.97		0.75	0.71	0.52				-0.58		0.79	
ARCILLA	0.64						0.55	-0.97		-0.67	-0.63	-0.48				0.53	-0.60	-0.75	
MO										-0.60	-0.62						-0.52		
pH H ₂ O1:5	-0.76	-0.58					-0.75	0.75	-0.67	-0.60							-0.59	-0.92	0.86
pH H ₂ O1:10	-0.77	-0.57					-0.73	0.71	-0.63	-0.62	0.99								
CIC	-0.72							0.52	-0.48				0.90	0.77					
Ca ²⁺	-0.61												0.90	0.84	0.52				
Mg ²⁺	-0.73		0.53										0.77	0.84	0.85		0.64		0.49
Na ⁺	-0.51										0.50		0.52	0.85		-0.55	0.57		0.86
K ⁺	0.52					0.51	-0.58	0.53		-0.59	-0.60			-0.55			-0.57	-0.59	
pHExt.Sat.	-0.87	-0.72				-0.78	0.70	-0.60	-0.52	0.92	0.94								
CE	-0.75					-0.65	0.79	-0.75		0.86	0.84								
PSI																0.86			

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A2. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-2 Xochimilco, D.F.

Variables	Prof.	H	DA	DR	PORO.	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI
Prof.		0.96	0.98		0.95				0.80	-0.87	-0.89		-0.96		-0.87		-0.82		-0.83
H	0.96		-0.94	-0.59	0.86				0.83	-0.91	-0.92		-0.89		-0.94		-0.91		-0.89
DA	-0.98	-0.94			-0.97				-0.78	0.85	0.88		0.96		0.86		0.82		0.80
DR		-0.59							-0.59	0.70	0.68				0.74	-0.70	0.77	-0.66	0.73
PORO.	0.95	0.86	-0.97						0.68	-0.74	-0.77		-0.98		-0.73		-0.68		-0.67
ARENA																			
LIMO								-0.93											
ARCILLA							-0.93												
MO	0.80	0.83	-0.78	-0.59	0.68					-0.95	-0.94		-0.66		-0.90	0.67	-0.90		-0.95
pH H ₂ O1:5	-0.87	-0.91	0.85	0.70	-0.74				-0.95	1.00			0.75		0.90	-0.65	0.96		0.97
pH H ₂ O1:10	-0.89	-0.92	0.88	0.68	-0.77				-0.94	1.00			0.78		0.98	-0.62	0.97		0.97
CIC														0.65					
Ca ²⁺	-0.96	-0.89	0.96		-0.98	0.63			-0.66	0.75	0.78				0.75		0.69		0.68
Mg ²⁺												0.60							
Na ⁺	-0.87	-0.94	0.86	0.74	-0.73				-0.90	0.97	0.98		0.75			-0.63	0.99		0.97
K ⁺				-0.70					-0.59	0.67	-0.65	-0.62			-0.63		-0.69	0.82	-0.71
pHExt.Sat.				-0.70					-0.59	0.67	-0.65	0.97	0.69		0.99	-0.69			0.97
CE				-0.66												0.82			
PSI	-0.83	-0.89	0.80	0.73	-0.67				-0.95	0.97	0.97				0.97	-0.71	0.97		

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A3. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-3 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Variables	Prof.	H	DA	DR	PORO.	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI
Prof.		0.88	-0.96		0.78				0.56	-0.87	-0.83		-0.70		-0.59	-0.72	-0.76	-0.74	-0.64
H	0.88		-0.88		0.69	0.64			0.80	-0.96	-0.94					-0.68	-0.89	-0.59	-0.61
DA	-0.96	-0.88			-0.84					0.84	0.81		0.69		0.58	0.70	0.74	0.72	0.63
DR							0.55		-0.55										
PORO.	0.78	0.69	-0.84							-0.54			-0.70			-0.54	-0.55	-0.60	
ARENA		0.64					-0.59		0.84	-0.66	-0.66	0.66	0.54				-0.60		
LIMO				0.55		-0.59		-0.90	-0.75			-0.60				0.56			
ARCILLA								-0.90											
MO	0.56	0.80		-0.55		0.84	-0.75			-0.80	-0.79	-0.85	0.69			-0.62	-0.70		-0.56
pH H ₂ O1:5	-0.87	-0.96	0.84		-0.54	-0.66			-0.80		0.99					0.58	0.92		
pH H ₂ O1:10	-0.83	-0.94	0.81			-0.66			-0.79	0.99							0.90		
CIC						0.66	-0.60		0.85					0.93					
Ca ²⁺	-0.70		0.69		-0.70									0.60					0.58
Mg ²⁺						0.54			0.69			0.93	0.60						
Na ⁺	-0.59		0.58													0.88			0.98
K ⁺	-0.72	-0.68	0.70		-0.54		0.56		-0.62	0.58						0.88			0.93
pHExt.Sat.	-0.76	-0.89	0.74		-0.55	-0.60			-0.70	0.92									0.95
CE	-0.74	-0.59	0.72		-0.60								0.58		0.98	0.93			0.95
PSI	-0.64	-0.61	0.63						-0.56						0.95	0.95			0.95

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A4. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-4 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F..

Variables	Prof.	H	DA	PORO.	Arena	Limo	Arcilla	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI
Prof.		0.87	-0.90	0.90	0.84			-0.88	-0.88	-0.80	-0.91	-0.92	-0.96	-0.85	-0.81	-0.94	-0.58
H	0.87		-0.97	0.94	0.92			-0.78	-0.78	-0.94	-0.86	-0.88	-0.87	-0.80	-0.59	-0.87	
DA	-0.90	-0.97		-0.97	-0.94			0.79	0.79	0.95	0.89	0.91	0.88	0.83	0.63	0.88	
PORO.	0.90	0.94	-0.97		0.91			-0.75	-0.75	-0.92	-0.88	-0.93	-0.87	-0.87	-0.63	-0.90	
ARENA	0.84	0.94	-0.94	0.91				-0.79	-0.79	-0.85	-0.87	-0.84	-0.84	0.80	-0.61	-0.83	
LIMO																	
ARCILLA							-0.67										
pH H ₂ O1:5	-0.88	-0.78	0.79	-0.75	-0.79					0.64	0.71	0.72	0.83	0.58	0.89	0.72	0.59
pH H ₂ O1:10	-0.88	-0.78	-0.79	-0.75	-0.79					0.64	0.71	0.72	0.83	0.58	0.89	0.72	0.59
CIC	-0.80	-0.94	0.95	-0.92	-0.85			0.64	0.64		0.83	0.86	0.83	0.80		0.83	
Ca ²⁺	-0.91	-0.86	-0.89	-0.88	-0.87			-0.71	-0.71	0.83		0.88	0.92	0.90	0.63	0.92	
Mg ²⁺	-0.92	-0.88	0.91	-0.93	-0.84			0.72	0.72	0.86	0.88		0.94	0.91	0.61	0.98	
Na ⁺	-0.96	-0.87	-0.88	-0.87	-0.84			0.83	0.83	0.83	0.92	0.94		0.84	0.77	0.96	0.61
K ⁺	-0.85	-0.80	0.83	-0.87	-0.80			0.58	0.58	0.80	0.90	0.91	0.84		0.57	0.90	
pHExt.Sat.	-0.81	-0.59	0.63	-0.63	-0.61			0.89	0.89		0.63	0.61	0.77	0.57		0.62	0.68
CE	-0.94	-0.87	0.88	-0.90	-0.83			0.72	0.72	0.83	0.92	0.98	0.96	0.90	0.62		
PSI	-0.58							0.59	0.59						0.68		

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A5. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-5 San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Variables	Prof.	H	DA	PORO.	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI
Prof.		0.90	-0.81	0.80	-0.66	-0.95	0.95		-0.88	-0.87	-0.82	-0.83	-0.80	-0.69		-0.75	-0.63	-0.60
H	0.90		-0.96	0.96	-0.75	-0.87	0.90	-0.60	-0.97	-0.96	-0.91	-0.94	-0.90	-0.76		-0.91	-0.70	-0.66
DA	-0.81	-0.96		-1.00	0.72	0.81	-0.85	0.74	0.96	0.96	0.94	0.98	0.90	0.76	0.60	0.91	0.70	0.65
PORO.	0.80	0.96	-1.00		-0.71	-0.80	0.84	-0.73	-0.96	-0.96	-0.94	-0.98	-0.90	-0.77	-0.61	-0.90	-0.71	-0.67
ARENA	-0.66	-0.75	0.72	-0.71		0.63	-0.78	0.64	0.75	0.76		0.68	0.58		0.74			
LIMO	-0.95	-0.87	0.81	-0.80	0.63		-0.98	0.45	0.84	0.84	0.82	0.80	0.77	0.61		0.78	0.55	0.51
ARCILLA	0.95	0.90	-0.85	0.84	-0.78	-0.98		-0.53	-0.88	-0.88	-0.88	-0.83	-0.78	-0.59		-0.83	-0.52	
MO		-0.60	0.74		0.64		-0.53		0.60	0.61	0.74	0.67	0.55			0.73		
pH H ₂ O1:5	-0.88	-0.97	0.96	-0.96	0.75	0.84	-0.88	0.60		1.00	0.94	0.95	0.86	0.73	0.56	0.92	0.66	0.61
pH H ₂ O1:10	-0.87	-0.96	0.96	-0.96	0.76	0.84	-0.88	0.61	1.00		0.94	0.95	0.86	0.71	0.56	0.91	0.64	0.60
CIC	-0.82	-0.91	0.94	-0.94	0.78	0.82	-0.88	0.74	0.94	0.94		0.95	0.88	0.71	0.48	0.91	0.65	0.55
Ca ²⁺	-0.83	-0.94	0.98	-0.98	0.68	0.80	-0.83	0.67	0.95	0.95	0.95		0.95	0.85	0.60	0.86	0.80	0.74
Mg ²⁺	-0.62	-0.69	0.68	-0.70		0.55	-0.51		0.64	0.86	0.88	0.95		0.93	0.56	0.78	0.90	0.85
Na ⁺	-0.69	-0.76	0.76	-0.77		0.61	-0.59		0.73	0.71	0.71	0.85	0.93		0.65	0.58	0.99	0.97
K ⁺			0.60	-0.61					0.56	0.56	0.48	0.62	0.56	0.65			0.61	0.6400
pHExt.Sat.	-0.75	-0.91	0.91	-0.90	0.74	0.78	-0.83	0.73	0.92	0.91	0.91	0.86	0.78	0.58			0.51	0.65
CE	-0.63	-0.70	0.70	-0.71		0.55	-0.52		0.66	0.64	0.65	0.80	0.90	0.99	0.61	0.51		0.93
PSI	-0.60	-0.66	0.65	-0.67		0.51			0.61	0.60	0.55	0.74	0.85	0.97	0.64		0.98	0.92

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A6. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-6 Tláhuac, D.F.

Variables	Prof.	H	DA	DR	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI
Prof.		0.95	-0.67	-0.89	0.83	-0.85		0.94	-0.86	-0.86	0.88		0.82		-0.93	-0.73	-0.80
H	0.95			-0.96	0.86	-0.89		0.97	-0.92	-0.93	0.95		0.90		-0.89	-0.85	-0.92
DA	-0.67							-0.67									
DR	-0.89	-0.96			-0.92	0.93		-0.97	0.82	0.85	-0.98		-0.91		0.81	0.77	0.91
ARENA	0.83	0.86				-0.94		0.86	-0.70	-0.73	0.92		0.79	0.73	-0.72		-0.78
LIMO	-0.85	-0.89			0.93	-0.94		-0.88	0.76	0.77	-0.95		-0.91	-0.65	0.77	0.72	0.84
ARCILLA										-0.85							
MO	0.94	0.97	-0.67	-0.97	0.86	-0.88			-0.82		0.96		0.91		-0.83	-0.81	-0.93
pH H ₂ O1:5	-0.86	-0.92			0.82	-0.70	0.76	-0.82	0.99	0.99	-0.82		-0.80		0.93	0.81	0.79
pH H ₂ O1:10	-0.86	-0.93			0.85	-0.73	0.77	-0.85	0.97		-0.85		-0.82		0.90	0.81	0.84
CIC	0.88	0.95			-0.98	0.92	-0.95	0.96	-0.82	-0.85			0.96		-0.77	-0.77	-0.91
Ca ²⁺															0.62		
Mg ²⁺	0.82	0.90			-0.91	0.79	-0.91	-0.62	0.91	-0.80	-0.82	0.96			-0.73	-0.77	-0.89
Na ⁺					0.73	-0.65											
pHExt.Sat.	-0.93	-0.89			0.81	-0.72	0.77	-0.83	0.93	0.90	-0.77	0.6200	-0.730			0.74	0.70
CE	-0.73	-0.85			0.77	0.72		-0.81	0.81	0.81	-0.77		-0.77		0.74		0.89
PSI	-0.80	-0.92			0.91	-0.78	0.84	-0.93	0.79	0.84	-0.91		-0.89		0.70	0.89	

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A7. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-7 Tláhuac, D.F.

Variables	Prof.	H	DA	PORO.	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI	
Prof.					0.88	-0.84			-0.83	-0.83		-0.67	-0.66	-0.72	-0.77	0.70	-0.93	-0.87	
H			-0.65																
DA			-0.65	-0.99				-0.63											
PORO.				-0.99															
ARENA	0.88					-0.80			-0.79	-0.79							-0.80	-0.72	
LIMO	-0.84				-0.80		-0.90					0.75	0.89	0.68	0.72	0.83	-0.75	0.86	0.69
ARCILLA						-0.90						-0.81	-0.95	-0.67	-0.69	-0.80	0.68	-0.70	-0.50
MO				-0.63															
pH H ₂ O1:5	-0.83				-0.79					1.00								0.71	0.75
pH H ₂ O1:10	-0.83				-0.79				1.00									0.71	0.75
CIC						0.75	-0.81					0.80	0.94	0.95	0.86	-0.76	0.81	0.72	
Ca ²⁺	-0.67					0.89	-0.95				0.80			0.67	0.76	-0.66	0.71		
Mg ²⁺	-0.66					0.68	-0.67				0.94			0.99	0.91	-0.84	0.87	0.87	
Na ⁺	-0.72					0.72	-0.69				0.95	0.67	0.99		0.90	-0.84	0.90	0.89	
K ⁺	-0.77					0.80	-0.80				0.86	0.76	0.91	0.90		-0.89	0.91	0.84	
pHExt.Sat	0.70					-0.75	0.68				-0.76	-0.66	-0.84	-0.84	-0.89		-0.88	-0.82	
CE	-0.93				-0.80	0.86	-0.70		0.71	0.71	0.81	0.71	0.87	0.90	0.91	-0.88		0.95	
PSI	-0.87				-0.72	0.69			0.75	0.75	0.72	0.87	0.89	0.84		-0.82	0.95		

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A8. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-8 Tláhuac, D.F.

Variables	Prof.	H	DA	PORO.	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI		
Prof.		0.78	-0.79	0.81	-0.78	0.68		-0.96	-0.90		-0.77	-0.57	-0.72		-0.66	-0.72	-0.80		
H				-0.93	0.91	-0.59	0.52	-0.81	-0.85		-0.53				-0.79				
DA					-0.99	-0.62					0.64								
PORO.						-0.69	0.61	-0.80	-0.80		-0.65				-0.80				
LIMO						-0.95		-0.61	0.52	0.68	0.77	0.74	0.72			0.72	0.75		
ARCILLA								-0.52		-0.65	-0.73	-0.74	-0.66			-0.67	-0.69		
MO									-0.52	-0.59									
pH H ₂ O1:5											0.66		0.59		0.80	0.58	0.68		
pH H ₂ O1:10											0.53				0.86		0.53		
CIC						0.68	-0.65				0.84	0.89	0.68	0.58		0.66	0.60		
Ca ²⁺						-0.77	-0.53	0.64	-0.65	0.77	-0.73					0.89	0.88		
Mg ²⁺						-0.57				0.74	-0.740					0.86	0.82		
Na ⁺						-0.72				0.72	-0.66		0.59			1.00	0.98		
K ⁺														0.56		0.57	0.52		
pHExt.Sat.										0.80	0.86								
CE						-0.66	-0.79	0.79	-0.80								0.98		
PSI						-0.72				0.720	-0.67		0.58						
						-0.80				0.75	-0.69		0.68		0.53	0.60	0.88	0.82	0.98

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A9. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-9 Mixquic, D.F.

Variables	Prof.	H	DA	DR	PORO.	Arena	Limo	Arcilla	MO	PH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI
Prof.	0.88	-0.96			0.77	-0.83				-0.85	-0.81	-0.68	-0.86	-0.92	-0.69	-0.78			-0.68
H	0.88		-0.94		0.69	-0.75	0.75			-0.92	-0.88		-0.94						
DA	-0.96	-0.94			-0.72	0.74	-0.72			0.93	0.91		0.92	0.82			0.69		
DR								0.69											
PORO.	0.77	0.69	-0.72			-0.90						-0.67		-0.71	-0.81	-0.87		-0.78	-0.80
ARENA	-0.83	-0.75	0.74		-0.90			-0.87					0.72	0.71	0.77	0.86		0.73	0.77
LIMO		0.75	-0.72							-0.86	-0.88		-0.82				-0.72		
ARCILLA				0.69				-0.87	-0.74										
MO								-0.74				0.91				0.68			
pH H ₂ O1:5	-0.85	-0.92	0.93				-0.86				0.99		0.92					0.84	
pH H ₂ O1:10	-0.81	-0.88	0.91				-0.88			0.99			0.90					0.87	
CIC	-0.68				-0.67				0.91					0.89		0.84		0.67	0.71
Ca ²⁺	-0.86	-0.94	0.92			0.72	-0.82			0.92	0.90								
Mg ²⁺	-0.92		0.82		-0.71	0.71						0.89			0.76	0.85		0.70	0.7300
Na ⁺	-0.69				-0.81	0.77						0.75	0.76		0.97			0.99	1.00
K ⁺	-0.78				-0.87	0.86		0.68				0.84	0.85	0.97				0.93	0.95
pHExt.Sat.			0.69				-0.72			0.84	0.87								
CE					-0.78	0.73						0.67	0.70	0.99	0.93				1.00
PSI	-0.68				-0.80	0.77						0.71	0.73	1.00	0.95				1.00

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A10. Matriz de correlaciones de las propiedades físicas y químicas del P-10 Mixquic, D.F.

Variables	Prof.	H	DA	DR	PORO.	Arena	Limo	Arcilla	MO	PH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pHExt.Sat.	CE	PSI
Prof.	0.95	-0.99	-0.84	0.98	-0.64	0.75		0.79	-0.84	-0.83	-0.66	-0.87	-0.74	-0.61	-0.58		-0.80	-0.71	
H	0.95		-0.97	-0.90	0.95		0.89	-0.65	0.89	-0.90	-0.89	-0.67	-0.80	-0.61			-0.87	-0.53	
DA	-0.99	-0.97		0.87	-0.99	0.62	-0.83	0.54	-0.84	0.90	0.89	0.70	0.89	0.71	0.55	0.54	0.86	0.65	
DR	-0.84	-0.90	0.87		-0.81	-0.84	0.72	-0.95	0.86	0.85			0.63				0.86		
PORO.	0.98	0.95	-0.99	-0.81		-0.67	0.80		0.79	-0.88	-0.88	-0.73	-0.92	-0.75	-0.58	-0.57	-0.84	-0.69	
ARENA	-0.64		0.62		-0.67								0.67	0.77	0.68	0.68		0.73	0.62
LIMO	0.75	0.89	-0.83	-0.84	0.80			-0.88	0.92	-0.93	-0.94	-0.60	-0.65				-0.94		
ARCILLA		-0.65	0.54	0.72				-0.88	-0.83	0.81	0.81						0.82		
MO	0.79	0.89	-0.84		0.79		0.92	-0.83		-0.89	-0.89		-0.57				-0.91		
pH H ₂ O1:5	-0.84	-0.90	0.90	0.86	-0.88	-0.93	0.81	-0.89			1.00	0.72	0.79				0.98		
pH H ₂ O1:10		-0.89	0.89	0.85	-0.88	-0.94	0.81	-0.89		1.00		0.73	0.79				0.98		
CIC	-0.66	-0.67	0.70		-0.73	-0.60				0.72	0.73		0.85	0.75		0.55	0.62	0.58	
Ca ²⁺	-0.87	-0.80	0.89	0.63	-0.92	0.67	-0.65	-0.57	0.79	0.79		0.85			0.64	0.64	0.73	0.74	
Mg ²⁺	-0.74	-0.61	0.71		-0.75	0.77		-0.91				0.75	0.81		0.92	0.93		0.96	0.78
Na ⁺	-0.61		0.55		-0.58	0.68							0.64	0.92		0.99		0.99	0.95
K ⁺	-0.58		0.54		-0.57	0.68							0.55	0.64		0.99		0.97	0.92
pHExt.Sat.	-0.80	-0.87	0.86	0.86	-0.84		-0.94	0.82		0.98	0.98	0.62	0.73						
CE	-0.71	-0.53	0.65		-0.69	0.73						0.58	0.74	0.96	0.99	0.97			0.91
PSI						0.62								0.78	0.95	0.92			0.91

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A11. Matriz de correlaciones de metales extractables (DTPA) Xochimilco, D.F.

Variables	Fe	Cu	Mn	Zn	Ni	Cr	Cd	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Fe		0.97	0.89					0.98	-0.92	0.96			0.94	0.97		
Cu	0.97		0.95					0.97	-0.93	0.95			0.9	0.92		0.83
Mn													-0.83	-0.85	-0.93	
Zn	0.89	0.95					0.93	0.88	-0.89	0.88			0.83			0.84
Ni											-0.88	-0.86				
Cr																0.89
Cd	0.89	0.91	0.93					0.92	-0.97	0.96			0.94	0.88		
LIMO	0.98	0.97	0.88				0.92		-0.97	0.99			0.97	0.98	0.82	
ARCILLA	-0.92	-0.93	-0.89				-0.97	-0.97		-0.99			-0.98	-0.94		
MO	0.96	0.95	0.88				0.96	0.99	-0.99				0.99	0.98	0.83	
Ph H ₂ O 1:5																
Ph H ₂ O 1:10																
CIC	0.94	0.90	-0.83	0.83			0.94	0.97	-0.98					0.98	0.87	
Mg ²⁺	0.97	0.92	-0.85				0.88	0.98	-0.94	0.98			0.98		0.87	
Na ⁺			-0.93					0.82		0.83			0.87	0.87		
K ⁺		0.83	0.84			0.89										

Nivel de Significancia Estadística $p < 0.0500$

Cuadro A12. Matriz de correlaciones de metales extractables (DTPA) San Luís Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Variables	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Cr	Cd	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Fe		0.92							-0.93	0.92				-0.83	-0.90			
Cu	0.92								-0.90	0.87				-0.74	-0.89			
Mn				0.97				0.90			0.71	-0.70	-0.71		0.72	0.89		
Zn							0.78	0.95			0.80	-0.77	-0.73			0.93		
Pb			0.97											0.69	0.77	0.74		
Cr															0.92			
Cd			0.86	0.78				0.72						0.73	0.95	0.85		
ARENA			0.90	0.95			0.72				0.85					0.92		
LIMO	-0.93	-0.90								-0.94					0.93			
ARCILLA	0.92	0.87							-0.94					-0.69	-0.78			
MO			0.71	0.80				0.85							-0.69			
Ph H ₂ O 1:5			-0.70	-0.77									0.89					-0.68
Ph H ₂ O 1:10			-0.71	-0.73								0.89						-0.70
CIC	-0.83	-0.74			0.69		0.73		0.70	-0.69					0.75	0.78		
Ca ²⁺		-0.89							0.93	-0.78	-0.69			0.75				
Mg ²⁺			0.72		0.77		0.95							0.78				0.67
Na ⁺					0.74	0.92												
K ⁺			0.89	0.93			0.85	0.92				-0.68	-0.70			0.67		

Nivel de Significancia Estadística $p < 0.0500$

Cuadro A13. Matriz de correlaciones de metales extractables (DTPA) Tláhuac, D.F.

Variables	Fe	Cu	Zn	Pb	Cd	Arena	Limo	Arcilla	MO	PH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
Fe			0.82	-0.67	0.75	-0.73									
Cu							0.70		0.79			0.89	0.75	0.86	
Zn	0.82				0.74										
Pb	-0.67						0.86	-0.97	0.9			0.89	0.72		
Cd	0.75		0.74						-0.88						0.70
ARENA	-0.73								-0.88						
LIMO		0.70		0.86				-0.91	0.85	0.72	0.76	0.81	0.69		
ARCILLA				-0.97					-0.91			-0.87	-0.70		
MO		0.79		0.9			0.85	-0.91			0.81	0.94	0.93		
pH H ₂ O 1:10								0.72							0.67
CIC		0.89					0.76	0.81				0.81	0.89		
Ca ²⁺		0.75		0.89			0.81	-0.87	0.94			0.81	0.87		
Mg ²⁺		0.86		0.72			0.69	-0.7	0.93			0.89	0.87		
Na ⁺					0.70					0.67					

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A14. Matriz de correlaciones de metales extractables (DTPA) Mixquic, D.F.

Variables	Fe	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O1:5	pH H ₂ O1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	
Fe										-0.86					-0.83				
Mn			0.89	0.85															
Zn		0.89		0.98	0.82		0.88								0.90				0.89
Pb		0.85	0.98				0.89								0.91				0.90
Ni			0.82																
Cr																-0.82	0.96		0.92
Cd			0.88	0.89															0.99
ARENA										-0.95	0.87				-0.86	0.83			
LIMO	-0.86																		
ARCILLA								-0.95			-0.95				-0.85	-0.83			
MO								0.87		-0.95					0.81				
pH H ₂ O1:5	-0.83		0.9	0.91															0.84
pH H ₂ O1:10			0.84	0.82		-0.82		-0.86					0.95						
CIC						0.96		0.83		-0.85	0.81								0.95
Ca ²⁺										-0.83									0.86
Mg ²⁺																			0.85
Na ⁺						0.92									0.95	0.86	0.85		
K ⁺			0.89	0.90				0.99					0.84						

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A15. Matriz de correlaciones de metales totales (PIXE) Xoch. D.F.

Variables	Fe	Cu	Mn	Zn	Ni	Cd	Limo	Arcilla	MO	CIC	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Fe		0.81		0.92	0.82		0.92	-0.94	0.94	0.9	0.87		0.83
Cu	0.81			0.83	0.83								
Mn						0.95							0.91
Zn	0.92	0.83						-0.83					0.84
Ni	0.82	0.83											
Cd			0.95										0.87
LIMO	0.92							-0.97	0.99	0.97	0.98	0.82	
ARCILLA	-0.94			-0.83			-0.97		-0.99	-0.98	-0.94		
MO	0.94						0.99	-0.99		0.99	0.98	0.83	
CIC	0.9						0.97	-0.98	0.99		0.98	0.87	
Mg ²⁺	0.87						0.98	-0.94	0.98	0.98		0.87	
Na ⁺							0.82		0.83	0.87	0.87		
K ⁺	0.83		0.91	0.84		0.87							

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A16. Matriz de correlaciones de metales totales (PIXE) San Luís Tlaxiataltemalco, Xoch. D.F.

Variables	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Fe								0.75										0.92
Cu				0.87														
Mn							0.80		-0.77	0.74					-0.69			
Zn		0.87									0.77							
Pb								0.68										
Ni															0.78		0.89	
Cr			0.80							0.68								
ARENA	0.75			0.68							0.85							0.92
LIMO										-0.94					0.70	0.93		
ARCILLA							0.68			-0.94					-0.69	-0.78		
MO				0.77				0.85								-0.69		
Ph H ₂ O 1:5													0.89					-0.68
Ph H ₂ O 1:10												0.89						-0.70
CIC						0.78			0.70	-0.69					0.75	0.78		
Ca ²⁺			-0.69						0.93	-0.78	-0.69				0.75			
Mg ²⁺															0.78			0.67
Na ⁺						0.89												
K ⁺	0.92							0.92				-0.68	-0.70			0.67		

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A17. Matriz de correlaciones de metales totales (PIXE) Tláhuac, D.F.

Variables	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cr	Cd	Arena	Limo	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	
Fe									-0.82										
Cu																			
Mn						-0.67	0.95												
Zn		0.84			0.70	0.68								-0.72	-0.67				
Pb				0.70															
Ni			-0.67	0.68															
Cr			0.95						0.72										
Cd																			0.70
ARENA	-0.82						0.72												
LIMO											-0.91	0.85			0.76	0.81	0.69		
ARCILLA										-0.91		-0.91		0.72		-0.87	-0.70		
MO										0.85	-0.91				0.81	0.94	0.93		
pH H ₂ O 1:5				-0.72															
pH H ₂ O 1:10	0.88			-0.67							0.72								0.67
CIC										0.76		0.81				0.81	0.89		
Ca ²⁺										0.81	-0.87	0.94					0.87		
Mg ²⁺										0.69	-0.7	0.93			0.89	0.87			
Na ⁺								0.70						0.67					

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

Cuadro A18. Matriz de correlaciones de metales totales (PIXE) Mixquic, D.F.

Variables	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Arena	Arcilla	MO	pH H ₂ O 1:5	pH H ₂ O 1:10	CIC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Cu		-0.85	0.81	0.84	0.98										
Mn					-0.86										
Zn				0.99	0.89								0.95		
Pb					0.89						0.88		0.93	0.83	
Ni		0.98	-0.86	0.89	0.89								0.84		
ARENA							-0.95	0.87		-0.86	0.83				
ARCILLA							-0.95	-0.95			-0.85	-0.83			
MO							0.87	-0.95			0.81				
pH H ₂ O 1:5										0.95					0.84
pH H ₂ O 1:10						-0.86			0.95						
CIC				0.88		0.83	-0.85	0.81							0.95
Ca ²⁺							-0.83								0.86
Mg ²⁺			0.95	0.93	0.84										0.85
Na ⁺				0.83							0.95	0.86	0.85		
K ⁺									0.84						

Nivel de Significancia Estadística p<0.0500

APÉNDICE B

Cuadro B1. Contenido de sales solubles del P-1 Xochimilco, D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	SUMA
meq L ⁻¹													
1	0-10	4.32	10.03	0.00	0.00	0.14	26.31	3.53	6.11	0.00	0.00	0.00	50.44
2	10-20	4.33	9.17	0.58	0.00	0.19	25.90	2.94	5.91	0.00	0.00	0.00	49.02
3	20-30	4.20	10.25	5.82	0.00	0.13	25.28	8.97	2.59	0.00	0.00	0.00	57.24
4	30-40	4.93	12.27	6.25	0.00	0.18	24.94	11.97	0.53	0.00	0.00	0.00	61.07
5	40-50	2.54	11.92	5.76	0.00	0.15	23.62	8.47	0.59	0.00	0.00	0.00	53.05
6	50-60	2.69	12.00	5.38	0.00	0.18	24.09	8.61	0.00	0.00	0.00	0.00	52.95
7	60-70	2.80	12.12	5.60	1.47	0.18	21.63	9.12	0.00	0.00	0.00	0.00	52.92
8	70-80	2.93	15.09	4.92	0.00	0.18	24.38	9.86	0.47	0.00	0.00	0.00	57.83
9	80-90	2.74	13.87	4.38	0.00	0.24	23.57	9.53	0.19	0.00	0.00	0.00	54.52
10	90-100	3.15	15.25	3.82	0.00	0.34	23.23	9.68	0.94	0.00	0.00	0.00	56.41
11	100-110	3.04	11.29	0.00	0.00	0.57	20.36	6.81	3.78	0.00	0.00	0.00	45.85
12	110-120	3.19	10.99	0.00	0.00	0.68	23.81	5.21	3.19	1.07	0.00	0.00	48.14
13	120-130	3.51	7.31	0.00	0.00	0.71	11.63	0.00	2.81	0.00	0.00	3.35	29.32
14	130-140	3.29	6.18	0.00	0.00	0.67	6.66	0.00	2.96	0.00	0.96	0.67	21.39
15	140-150	3.29	5.53	0.00	0.00	0.63	6.70	0.00	2.96	0.00	2.59	0.00	21.70
16	150-160	3.57	9.22	0.00	0.00	0.80	22.86	7.53	2.47	0.00	0.00	0.00	46.45
17	160-170	4.52	8.60	0.00	0.00	0.79	19.26	0.89	3.17	3.64	0.00	0.00	40.87

Cuadro B2. Contenido de sales solubles del P-2 Xochimilco, D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	SUMA
Meq L ⁻¹													
18	0-10	8.99	15.57	3.70	0.00	0.38	23.31	2.30	7.88	0.00	0.00	0.00	62.13
19	10-20	6.21	18.04	9.33	0.00	0.41	19.99	8.33	2.56	0.00	0.00	0.00	64.87
20	20-30	6.49	14.57	7.20	0.00	0.36	21.20	0.13	8.51	0.00	0.00	0.00	58.46
21	30-40	5.67	20.45	0.00	0.00	0.14	7.15	0.00	6.53	5.32	0.00	0.00	45.26
22	40-50	7.09	15.45	8.96	0.00	0.09	12.93	3.38	3.09	0.00	0.00	0.00	50.99
23	50-60	5.33	11.44	8.56	0.00	0.12	10.90	2.11	2.11	0.00	0.00	0.00	40.57
24	60-70	6.78	14.54	1.48	0.00	0.13	7.12	0.00	5.92	4.52	0.00	0.00	40.49
25	70-80	2.15	9.23	7.68	0.00	0.13	8.92	4.77	0.52	0.00	0.00	0.00	33.40
26	80-90	0.00	19.82	9.09	1.13	0.18	25.86	14.05	0.00	0.00	0.00	0.00	70.13
27	90-100	0.00	16.12	1.27	5.36	0.31	32.59	16.04	0.00	0.00	0.00	0.00	71.69
28	100-110	0.00	14.26	1.21	2.87	0.59	42.46	14.46	0.00	0.00	0.00	0.00	75.85
29	110-120	0.00	19.94	0.28	0.00	0.73	35.32	14.10	2.15	0.00	0.00	0.00	72.52

Cuadro B3. Contenido de sales solubles del P-3 San Luis Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄ Meq L ⁻¹	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	SUMA
30	0-10	4.85	147.38	28.64	64.39	5.68	221.22	28.14	0.00	0.00	0.00	0.00	500.30
31	10-20	4.08	44.90	21.09	54.67	7.36	71.99	15.78	0.00	0.00	0.00	0.00	219.87
32	20-30	4.65	31.72	14.73	147.43	0.96	46.97	16.78	0.00	0.00	0.00	0.00	163.24
33	30-40	6.35	26.19	15.87	35.29	1.19	53.41	17.68	0.00	0.00	0.00	0.00	155.98
34	40-50	4.32	21.84	14.39	18.83	0.66	44.81	12.75	0.00	0.00	0.00	0.00	117.60
35	50-60	0.00	17.26	11.54	5.98	3.57	30.96	17.27	0.00	0.00	0.00	0.00	86.58
36	60-70	0.00	12.75	11.36	6.55	2.93	27.23	13.87	0.00	0.00	0.00	0.00	74.69
37	70-80	0.00	9.52	8.37	26.23	4.03	34.31	17.64	0.00	0.00	0.00	0.00	100.10
38	80-90	0.00	6.31	5.50	21.77	2.84	37.65	13.54	0.00	0.00	0.00	0.00	87.61
39	90-100	0.00	5.79	5.52	19.37	3.23	30.09	10.18	0.00	0.00	0.00	0.00	74.18
40	100-110	0.00	3.00	3.56	16.43	2.74	17.08	9.13	0.00	0.00	0.00	0.00	51.94
41	110-120	0.00	3.27	2.78	16.00	2.78	17.02	6.53	0.00	0.00	0.00	0.00	48.38
42	120-130	0.00	10.15	8.70	0.00	2.69	16.88	4.40	1.09	0.00	0.00	0.00	43.91
43	130-140	0.00	9.36	6.28	0.00	2.74	16.62	4.94	0.93	0.00	0.00	0.00	40.87

Cuadro B4. Contenido de sales solubles del P-4 San Luis Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄ Meq L ⁻¹	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	SUMA
44	0-10	5.71	95.10	0.00	0.00	15.52	75.67	0.00	19.29	0.00	1.12	2.41	214.82
45	10-20	2.48	64.38	3.67	0.00	10.06	63.33	6.61	12.16	0.00	0.00	0.00	162.69
46	20-30	5.61	71.82	0.00	0.00	10.58	72.95	2.15	16.82	0.00	0.00	2.40	182.33
47	30-40	4.23	63.52	2.96	0.00	8.56	64.44	0.00	16.05	0.00	0.00	0.00	159.76
48	40-50	4.41	47.03	7.65	0.00	4.97	57.26	1.40	12.94	0.00	0.00	0.00	135.66
49	50-60	6.56	48.39	2.37	0.00	2.10	52.59	10.62	8.29	0.00	0.00	0.00	130.92
50	60-70	2.80	38.42	3.08	0.00	0.64	38.36	17.92	3.62	0.00	0.00	0.00	104.84
51	70-80	1.57	35.51	1.25	0.00	0.62	39.41	9.89	6.66	0.00	0.00	0.00	94.91
52	80-90	3.03	32.33	0.00	0.00	0.64	31.67	3.39	9.31	0.00	0.00	0.00	80.37
53	90-100	0.00	27.14	2.07	0.00	0.74	31.62	8.94	3.37	0.00	0.00	0.00	73.88
54	100-110	0.00	22.83	4.55	5.38	0.87	31.83	8.16	0.00	0.00	0.00	0.00	73.62
55	110-120	0.00	29.44	0.35	0.00	0.88	24.04	6.72	3.75	0.00	0.00	0.00	65.18
56	120-130	0.00	23.89	5.52	0.00	1.00	29.11	11.74	0.00	0.00	0.00	0.00	71.26
57	130-140	0.00	20.37	6.54	2.52	1.02	22.20	9.79	0.00	0.00	0.00	0.00	62.44

Cuadro B5. Contenido de sales solubles del P-5 San Luis Tlaxialtemalco, Xoch. D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	SUMA
		Meq L ⁻¹											
58	0-10	5.93	67.42	12.59	47.96	0.37	47.62	14.89	0.00	0.00	0.00	0.00	196.78
59	10-20	3.57	19.04	13.09	11.75	0.22	22.67	12.82	0.00	0.00	0.00	0.00	83.16
60	20-30	5.30	15.75	11.50	0.00	0.20	13.00	6.65	1.08	0.00	0.00	0.00	53.48
61	30-40	5.15	10.57	4.85	0.00	0.15	7.09	1.15	3.40	0.00	0.00	0.00	32.36
62	40-50	3.59	10.20	0.00	0.00	0.11	3.48	0.00	5.18	2.01	0.11	0.00	24.68
63	50-60	0.93	7.58	0.00	0.00	0.06	3.51	0.00	4.25	1.19	0.00	0.00	17.52
64	60-70	0.00	5.50	0.00	0.00	0.08	2.08	0.00	3.62	1.00	0.77	0.00	13.05
65	70-80	0.00	5.80	0.00	0.00	0.12	3.34	0.00	4.18	0.23	0.83	0.00	14.50
66	80-90	0.00	5.26	0.00	0.00	0.05	3.42	0.00	3.95	0.10	0.61	0.00	13.39
67	90-100	0.00	3.62	0.00	0.00	0.05	2.80	0.10	2.59	0.00	0.00	0.20	9.36
68	100-110	0.00	5.29	0.00	0.00	0.14	0.95	0.00	2.64	1.17	0.96	0.00	11.15
69	110-120	0.00	4.18	0.00	0.00	0.16	3.16	0.00	2.69	0.00	0.34	0.13	10.66
70	120-130	0.00	3.07	0.65	0.00	0.17	1.89	1.26	2.26	0.00	0.00	0.00	9.30
71	130-140	0.00	3.86	0.00	0.00	0.18	0.37	0.00	3.18	0.05	1.43	0.00	9.07
72	140-150	0.00	4.39	0.00	0.00	0.20	0.90	0.00	3.52	0.77	0.89	0.00	10.67
73	150-160	0.00	5.63	0.00	0.00	0.24	3.63	0.00	4.67	0.86	0.45	0.00	15.48
74	160-170	0.00	4.21	0.02	0.00	0.37	4.34	0.00	3.28	0.00	0.00	0.00	12.22
75	170-180	0.00	4.66	0.00	0.00	0.20	3.90	0.42	4.02	0.00	0.00	0.03	13.23

Cuadro B6. Contenido de sales solubles del P-6 Tláhuac, D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	SUMA
		Meq L ⁻¹											
76	0-10	1.31	20.90	11.76	8.51	0.49	36.56	16.96	0.00	0.00	0.00	0.00	96.49
77	10-20	1.35	18.84	10.81	4.51	0.37	21.40	12.36	0.00	0.00	0.00	0.00	69.64
78	20-30	1.46	20.95	10.22	13.59	0.23	30.61	11.85	0.00	0.00	0.00	0.00	88.91
79	30-40	1.28	21.55	10.90	25.45	0.17	31.74	11.85	0.00	0.00	0.00	0.00	102.94
80	40-50	2.74	25.84	16.44	3.94	0.15	41.09	13.89	0.00	0.00	0.00	0.00	104.09
81	50-60	1.35	23.27	12.84	6.04	0.12	38.37	13.17	0.00	0.00	0.00	0.00	95.16
82	60-70	4.03	19.44	18.79	0.00	0.14	38.47	9.69	0.00	0.00	0.99	0.00	91.55
83	70-80	2.56	18.92	14.74	0.73	0.30	27.35	10.06	0.00	0.00	0.00	0.00	74.66
84	80-90	2.56	17.65	10.90	0.00	0.28	20.14	9.48	0.00	0.00	3.38	0.00	64.39
85	90-100	1.16	14.73	8.72	0.00	0.27	16.74	8.28	0.00	0.00	1.00	0.00	50.90
86	100-110	1.23	14.77	11.73	0.00	0.33	19.78	7.23	0.00	0.00	1.93	0.00	57.00

Cuadro B7. Contenido de sales solubles del P-7 Tláhuac, D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	SUMA
		Meq L ⁻¹											
87	0-10	1.05	30.66	5.75	39.32	0.38	40.99	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	118.79
88	10-20	2.11	14.01	7.37	5.84	0.43	32.46	7.59	0.00	0.00	0.00	0.00	69.81
89	20-30	2.41	15.13	7.95	10.09	0.39	30.45	7.33	0.00	0.00	0.00	0.00	73.75
90	30-40	4.46	13.68	9.377	0.00	0.27	21.18	8.77	0.00	0.00	0.42	0.00	58.15
91	40-50	5.49	6.52	10.44	0.00	0.19	9.28	11.24	0.00	0.00	7.64	0.00	50.80
92	50-60	3.30	9.07	7.26	0.00	0.13	10.90	7.36	0.00	0.00	1.29	0.00	39.31
93	60-70	3.59	5.91	7.19	0.00	0.13	3.77	4.24	0.00	0.00	5.04	0.00	29.87
94	70-80	2.97	3.96	5.93	0.00	0.15	0.00	4.72	0.00	0.00	5.01	1.41	24.15
95	80-90	2.92	5.05	4.39	0.00	0.18	0.66	4.80	0.00	0.00	5.18	0.00	23.18
96	90-100	2.79	6.39	4.19	0.00	0.17	2.68	1.34	0.00	0.00	3.38	0.00	20.94

Cuadro B8. Contenido de sales solubles del P-8 Tláhuac, D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	SUMA
		Meq L ⁻¹											
97	0-10	3.31	166.72	23.20	130.66	4.83	121.05	11.73	0.00	0.00	0.00	0.00	461.50
98	10-20	1.60	64.94	17.60	37.93	1.71	46.66	16.24	0.00	0.00	0.00	0.00	186.68
99	20-30	1.41	45.04	14.79	24.63	1.15	39.76	15.68	0.00	0.00	0.00	0.00	142.46
100	30-40	2.34	28.29	10.53	14.60	0.63	25.24	13.14	0.00	0.00	0.00	0.00	94.77
101	40-50	2.67	21.32	12.67	7.87	0.30	14.94	6.59	0.00	0.00	0.00	0.00	66.36
102	50-60	2.35	17.36	10.70	0.00	0.14	12.53	2.95	1.65	0.00	0.00	0.00	47.68
103	60-70	2.21	7.50	8.29	0.00	0.10	0.59	4.04	0.00	0.00	7.45	0.00	30.18
104	70-80	2.16	6.29	7.57	0.00	0.09	0.00	3.56	0.00	0.00	6.44	1.01	27.12
105	80-90	2.15	5.32	8.06	0.00	0.20	0.00	5.33	0.00	0.00	4.96	0.74	26.76
106	90-100	1.01	5.60	6.57	0.00	0.26	0.00	2.52	0.00	0.00	5.69	1.55	23.20
107	100-110	1.02	5.94	5.10	0.00	0.40	0.00	2.22	0.00	0.00	4.32	1.45	20.45
108	110-120	0.83	6.57	6.20	0.00	0.41	2.49	2.77	0.00	0.00	1.22	0.00	20.49
109	120-130	0.00	7.53	6.03	0.00	0.58	3.05	1.91	0.00	0.00	0.60	0.00	19.70
110	130-140	0.00	6.80	4.35	0.00	0.59	0.00	3.46	0.00	0.00	1.13	0.38	16.71
111	140-150	0.00	6.47	3.66	0.00	0.61	0.00	3.24	0.00	0.00	1.61	0.03	15.62

Cuadro B9. Contenido de sales solubles del P-9 Mixquic, D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Meq L ⁻¹											SUMA
		Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	
112	0-10	3.97	73.22	3.97	0.00	17.30	62.72	11.15	0.00	0.00	40.28	0.00	212.61
113	10-20	6.90	13.38	6.90	0.00	5.95	20.16	4.03	0.00	0.00	9.95	0.00	67.27
114	20-30	5.48	5.87	5.48	0.00	3.68	0.00	5.06	0.00	0.00	14.02	0.33	39.92
115	30-40	4.92	6.61	4.92	0.00	2.85	0.00	0.66	0.00	0.00	15.90	2.36	38.22
116	40-50	3.75	5.00	3.75	0.00	1.98	0.00	2.84	0.00	0.00	13.53	0.43	31.28
117	50-60	2.09	6.87	2.09	0.00	1.88	7.75	2.48	0.00	0.00	5.58	0.00	28.74
118	60-70	5.84	3.14	5.84	0.00	2.46	5.43	4.34	0.00	0.00	13.02	0.00	40.07
119	70-80	3.64	5.71	3.64	0.00	2.78	0.00	2.51	0.00	0.00	13.45	0.22	31.95
120	80-90	3.73	4.65	3.73	0.00	2.06	3.59	3.69	0.00	0.00	8.08	0.00	29.53

Cuadro B10. Contenido de sales solubles del P-10 Mixquic, D.F.

Muestra No.	Profundidad cm	Meq L ⁻¹											SUMA
		Na ₂ CO ₃	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	K ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	Mg(HCO ₃) ₂	MgCl ₂	CaCl ₂	
121	0-10	6.49	48.99	29.87	38.76	3.72	97.93	13.45	0.00	0.00	0.00	0.00	239.21
122	10-20	7.02	23.02	15.20	8.65	0.79	44.96	13.92	0.00	0.00	0.00	0.00	113.56
123	20-30	5.37	22.56	16.11	3.91	0.63	35.94	15.86	0.00	0.00	0.00	0.00	100.38
124	30-40	3.33	14.12	12.22	7.73	0.36	18.81	7.18	0.00	0.00	0.00	0.00	63.75
125	40-50	3.77	14.96	13.84	1.93	0.42	20.07	6.14	0.00	0.00	0.00	0.00	61.13
126	50-60	2.45	15.60	12.27	1.65	0.26	17.56	8.91	0.00	0.00	0.00	0.00	58.70
127	60-70	3.95	18.34	11.16	0.00	0.27	17.44	7.09	0.68	0.00	0.00	0.00	58.93
128	70-80	4.82	14.33	6.97	0.00	0.23	17.23	5.22	2.67	0.00	0.00	0.00	51.47
129	80-90	2.42	12.92	9.07	0.00	0.29	14.85	5.21	3.05	0.00	0.00	0.00	47.81
130	90-100	4.32	15.93	6.84	0.00	0.40	11.55	2.12	6.83	0.00	0.00	0.00	47.99
131	100-110	5.71	14.53	9.16	0.00	0.50	18.83	2.70	3.98	0.00	0.00	0.00	55.41
132	110-120	4.03	13.76	8.05	3.74	0.51	16.37	6.98	0.00	0.00	0.00	0.00	53.44
133	120-130	6.62	13.03	5.86	0.00	0.50	16.85	5.05	0.76	0.00	0.00	0.00	48.67
134	130-140	6.37	13.06	4.57	0.00	0.47	13.95	2.50	3.07	0.00	0.00	0.00	43.99

APÉNDICE C

Cuadro C1. Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de biomasa total, peso seco en follaje y raíz, longitud de la planta, ancho de la hoja y número de hojas en acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

Tratamiento	Biomasa total	Peso seco de follaje	Peso seco de raíz	Longitud de la planta	Ancho de la hoja	Número de hojas
1	7.585 a	5.692 c	1.825 a	20.248 c	5.260 d	7.687 b
2	9.693 ab	7.240 bc	2.468 a	21.353 bc	5.525 bcd	7.687 b
3	10.095 ab	7.585 bc	2.460 a	24.155 abc	5.588 bcd	8.125 ab
4	9.348 ab	7.695 bc	1.645 a	25.248 abc	6.227 abcd	8.063 ab
5	9.405 ab	7.047 bc	2.345 a	23.297 abc	5.485 cd	8.563 ab
6	11.033 ab	8.220 abc	2.830 a	24.017 abc	6.017 abcd	7.687 b
7	11.852 ab	7.187 bc	4.623 a	25.090 abc	6.210 abcd	8.250 ab
8	12.703 ab	10.485 abc	2.155 a	26.810 abc	7.790 abc	9.250 ab
9	10.710 ab	8.523 abc	2.072 a	25.900 abc	6.395 abcd	9.063 ab
10	9.977 ab	8.198 abc	1.663 a	24.905 abc	6.060 abcd	8.250 ab
11	13.415 ab	10.263 abc	3.055 a	25.748 abc	6.365 abcd	9.438 ab
12	10.335 ab	8.038 bc	2.263 a	24.565 abc	6.492 abcd	7.937 ab
13	13.673 ab	10.465 abc	3.150 a	28.153 a	6.270 abcd	9.250 ab
14	13.150 ab	10.218 abc	2.955 a	25.153 abc	6.660 abc	8.500 ab
15	14.785 a	11.700 ab	3.038 a	26.155 abc	6.528 abcd	9.438 ab
16	15.283 a	11.303 ab	3.898 a	26.965 ab	6.477 abcd	9.000 ab
17	14.020 ab	11.425 ab	2.465 a	26.945 ab	7.128 a	9.020 ab
18	16.105 a	13.083 a	2.920 a	27.248 ab	6.867 ab	9.938 a
DMS	6.9339	4.9777	3.6001	6.6867	1.3707	2.1708
CME	717.02	3.6851	1.9329	6.6681	0.2801	0.7027
aC.V.	22.6112	21.0514	52.3350	10.2845	8.4810	0.8383
ANOVA SS	389.32	278.01	39.23	276.64	17.81	33.15

DMS = Diferencia Mínima Significativa; CME: Cuadrado Mínimo del Error; C.V.= Coeficiente de Variación.

Cuadro C2. Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de metales traza y metales pesados en acelga (*Beta vulgaris* L. var. *ciela*)

Tratamiento	Pb	Ni	Cr	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
1	3.750 a	7.125 b	1.875 a	1.500 ab	57.122 a	6.250 ab	27.625 ab	19.550 a
2	5.500 a	10.600 ab	1.750 a	1.625 ab	63.720 a	3.000 ab	32.875 a	24.500 a
3	1.250 a	17.750 ab	1.750 a	1.125 ab	65.847 a	4.625 ab	33.250 a	22.825 a
4	2.125 a	7.000 b	1.875 a	1.500 ab	63.213 a	6.125 ab	12.625 bc	29.875 a
5	5.000 a	11.750 ab	1.875 a	1.750 ab	76.000 a	4.000 ab	26.375 abc	35.500 a
6	7.626 a	13.375 ab	2.000 a	1.875 ab	62.000 a	4.000 ab	26.500 abc	24.250 a
7	3.500 a	7.250 b	1.875 a	1.250 ab	62.875 a	5.750 ab	14.375 bc	26.000 a
8	4.625 a	10.625 ab	2.625 a	1.375 ab	62.000 a	2.750 ab	17.375 abc	16.625 a
9	4.375 a	19.500 a	2.250 a	1.250 ab	58.875 a	3.750 ab	20.000 abc	15.750 a
10	3.375 a	11.250 ab	2.000 a	1.000 ab	64.125 a	6.125 ab	10.375 c	26.500 a
11	2.625 a	10.125 ab	1.625 a	1.250 ab	60.125 a	3.125 ab	14.750 bc	17.875 a
12	1.625 a	16.875 ab	2.000 a	1.250 ab	74.125 a	1.750 b	27.250 abc	21.500 a
13	3.000 a	8.375 ab	2.625 a	1.375 ab	53.125 a	7.500 a	13.500 bc	26.750 a
14	5.125 a	15.500 ab	1.750 a	1.250 ab	55.375 a	3.000 ab	17.625 abc	18.375 a
15	3.750 a	16.750 ab	1.625 a	2.125 a	52.000 a	3.625 ab	19.500 abc	19.875 a
16	5.250 a	6.875 b	1.500 a	1.250 ab	63.625 a	7.125 a	14.625 bc	27.625 a
17	5.020 a	11.500 ab	2.000 a	1.375 ab	64.375 a	3.125 ab	22.875 abc	21.075 a
18	4.125 a	18.875 ab	1.875 a	1.625 ab	62.875 a	1.750 b	21.500 abc	22.250 a
DMS	6.9437	12.151	1.733 a	1.1003	30.972 a	4.8803	17.244	22.205
CME	7.1906	22.0198	0.4479	0.1805	143.06	3.5520	44.3449	73.5353
C.V.	67.3659	38.2024	34.5427	29.7030	19.1988	43.8443	32.1355	37.0422
ANOVA SS	164.7377	1258.31	6.2812	5.4027	2538.72	213.51	3304.81	1730.81

DMS = Diferencia Mínima Significativa; CME: Cuadrado Mínimo del Error; C.V.= Coeficiente de Variación.

Apéndice C3. Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de metales traza y metales pesados extractables (DTPA) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

Tratamiento	Pb	Ni	Cr	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
1	1.38 d	1.53 c	0.10 a	0.263 a	58.73 a	1.42 ba	15.29 ba	1.30 edc
2	1.63 d	146.67 b	0.11 a	0.245 a	37.89 dc	1.23 bac	9.55 c	1.04 e
3	1.75 d	328.90 a	0.11 a	0.205 a	29.03 dc	1.24 bac	8.89 c	1.01 e
4	377.00 bc	1.71 c	0.15 a	0.223 a	43.27 bac	1.09 bc	9.73 c	1.06 e
5	217.45 cd	147.54 b	0.16 a	0.195 a	35.09 dc	1.18 bac	9.13 c	1.10 ed
6	325.56 cd	237.25 ab	0.20 a	0.230 a	30.40 dc	1.14 bc	9.01 c	1.01 e
7	664.80 a	1.23 c	0.18 a	0.230 a	36.66 dc	1.00 c	8.32 c	0.99 e
8	506.70 ab	163.60 b	0.19 a	0.220 a	32.54 dc	1.06 c	9.03 c	1.00 e
9	458.00 abc	229.75 ab	0.21 a	0.285 a	25.00 d	1.01 c	7.54 c	0.89 e
10	1.75 d	1.44 c	0.13 a	0.315 a	56.37 ba	1.51 a	16.74 a	2.37 a
11	1.73 d	134.09 bc	0.18 a	0.290 a	36.73 dc	1.17 bac	10.19 c	1.82 bac
12	1.53 d	308.50 a	0.15 a	0.328 a	26.39 dc	1.16 bc	9.33 c	1.66 bdc
13	341.00 bc	1.15 c	0.18 a	0.247 a	40.78 bdc	1.17 bac	10.76 bc	2.06 ba
14	219.97 dc	144.07 bc	0.20 a	0.288 a	34.55 dc	1.18 bac	10.30 c	1.80 bac
15	253.61 bcd	313.00 a	0.13 a	0.227 a	26.91 dc	1.12 bc	9.31 c	2.01 ba
16	515.14 ab	1.19 c	0.13 a	0.225 a	38.09 dc	1.04 c	9.79 c	1.96 ba
17	479.70 abc	144.07 bc	0.13 a	0.268 a	29.62 dc	1.04 c	9.17 c	1.74 bc
18	402.50 abc	309.15 a	0.17 a	0.280 a	24.74 d	1.05 c	8.60 c	1.78 bc
DMS	265.04	143.12	0.2426	0.4655	17.476	0.3242	4.7105	0.5729
CME	8606.33	2028.07	0.00102	0.00025	31.9989	0.0413	2.9327	0.0271
C.V.	44.0948	37.4568	27.2473	32.5648	20.1794	17.5408	26.0955	13.1878
ANOVA SS	2186266.8	662321.8	0.0142	0.0067	1185.69	0.2813	100.50	6.3213

DMS = Diferencia Mínima Significativa; CME: Cuadrado Mínimo del Error; C.V.= Coeficiente de Variación.

Cuadro C4 Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de metales traza de metales pesados extractables (DTPA) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

Tratamiento	Pb	Ni	Cr	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
1	1.38 e	1.55 e	0.1200 a	0.06 a	35.515 a	1.080 a	7.900 a	1.142 fgde
2	1.63 a	113.37 de	0.1250 a	0.04 a	27.920 a	1.242 a	6.375 a	1.070 fge
3	1.48 e	222.60 bdac	0.1200 a	0.05 a	23.395 a	1.245 a	5.275 a	0.927 fg
4	169.58 ed	1.61 e	0.1325 a	0.06 a	29.015 a	1.072 a	6.100 a	1.143 fgde
5	211.42 dc	136.92 bdc	0.1225 a	0.04 a	26.022 a	1.210 a	5.000 a	0.932 fg
6	286.43 bdc	154.75 bdac	0.1075 a	0.05 a	27.030 a	1.155 a	6.275 a	0.973 fg
7	401.70 bac	1.66 e	0.1200 a	0.04 a	28.960 a	1.092 a	5.650 a	1.035 fge
8	458.85 ba	132.73 bdc	0.1050 a	0.04 a	25.962 a	1.145 a	5.450 a	0.908 fg
9	433.37 ba	231.75 bac	0.1225 a	0.04 a	21.185 a	1.153 a	5.025 a	0.857 g
10	1.50 e	1.85 e	0.1325 a	0.06 a	35.448 a	1.207 a	9.000 a	1.907 a
11	1.39 e	118.63 dc	0.1300 a	0.04 a	30.632 a	1.217 a	7.450 a	1.400 bdec
12	1.39 e	259.98 a	0.1175 a	0.06 a	26.475 a	1.185 a	6.350 a	1.328 fbdec
13	211.48 dc	1.96 e	0.0850 a	0.07 a	34.445 a	1.092 a	8.450 a	1.690 ba
14	224.12 dc	132.96 bdc	0.1275 a	0.05 a	28.790 a	1.143 a	7.625 a	1.430 bdec
15	225.40 dc	263.87 a	0.1125 a	0.04 a	24.095 a	1.140 a	6.500 a	1.425 bdec
16	299.82 bdc	1.83 e	0.1025 a	0.06 a	30.622 a	1.035 a	7.800 a	1.610 bac
17	554.62 a	139.15 bdc	0.1075 a	0.05 a	27.483 a	1.225 a	6.550 a	1.525 bdac
18	405.75 bac	247.00 ba	0.1000 a	0.04 a	22.330 a	1.220 a	5.350 a	1.197 fgdec
DMS	200.07	116.62	0.0818	0.0417	14.653	0.5264	44.345	0.4269
CME	8606.36	2028.07	0.0010	0.00025	31.99	0.0413	2.93	0.027
C.V.	44.09	37.45	27.24	32.56	20.17	17.54	26.09	13.18
ANOVA SS	2186266.89	662321.84	0.0142	0.0142	1185.69	0.2813	100.50	6.321

DMS = Diferencia Mínima Significativa; CME: Cuadrado Mínimo del Error; C.V.= Coeficiente de Variación.

Cuadro C5. Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el método de Tukey de metales traza y metales totales (PIXE) en el suelo de invernadero antes de la siembra de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

Tratamiento	Pb	Ni	Cr	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
1	54.1 dc	42.6 hg	103.17 a	253.28 bdc	11598 a	24.70 b	168.8 a	38.25 ba
2	57.6 dc	794.6 ebdac	274.32 a	239.83 bdc	11827 a	16.15 b	255.8 a	39.25 ba
3	22.3 d	1153.1 a	86.90 a	210.08 dc	12422 a	32.10 b	224.4 a	34.35 ba
4	126.4 dc	184.7 hgf	283.12 a	746.83 a	20465 a	53.83 b	564.1 a	50.95 ba
5	157.6 dc	363.0 edhgf	91.35 a	220.82 bdc	10505 a	148.08 ba	200.1 a	132.65 a
6	456.1 bdc	930.2 bac	45.48 a	217.02 bdc	8190 a	29.72 b	113.8 a	34.63 ba
7	921.5 a	28.4 h	87.35 a	459.20 bdac	13160 a	29.35 b	348.8 a	18.73 b
8	480.8 bac	355.4 ehgf	123.55 a	153.95 d	7861 a	315.85 a	109.9 a	46.68 ba
9	730.1 ba	925.8 bdac	56.30 a	149.08 d	10315 a	25.48 b	147.1 a	36.60 ba
10	32.7 dc	9.5 h	44.43 a	386.10 bdc	12243 a	17.90 b	125.4 a	44.72 ba
11	22.8 d	375.6 edhgcf	55.03 a	410.10 bdc	11733 a	23.73 b	179.0 a	26.77 ba
12	17.2 d	994.1 ba	55.65 a	234.73 bdc	12971 a	46.48 b	221.8 a	54.73 ba
13	330.5 bdc	15.2 h	38.73 a	493.70 bac	11635 a	27.05 b	149.6 a	20.70 b
14	285.6 bdc	527.3 ebdhgcf	32.33 a	473.20 bdac	11338 a	42.55 b	184.9 a	38.08 ba
15	392.1 bdc	701.5 ebdacf	35.28 a	546.72 ba	11197 a	20.28 b	151.5 a	38.82 ba
16	712.0 ba	32.8 h	13.75 a	312.45 bdc	11079 a	25.42 b	123.0 a	33.60 ba
17	663.1 ba	599.5 ebdagcf	26.45 a	490.72 bac	8192 a	18.31 b	116.0 a	43.57 ba
18	726.3 ba	990.4 ba	93.85 a	259.67 bdc	26134 a	213.30 baq	294.2 a	53.55 ba
DMS	451.86	566.45	298.58	332.4	25296 a	211.68	618.54	107.97
CME	30450.31	47853.2	13295.25	16477.61	95429589	6682.35	57059.39	1738.63
C.V.	50.75	218.75	133.92	36.92	78.89	132.52	116.89	95.40
ANOVA SS	6247173.5	10781996.7	393583.2	1782047.2	12995211182	451491.41	451491.41	40234.17

DMS = Diferencia Mínima Significativa; CME: Cuadrado Mínimo del Error; C.V.= Coeficiente de Variación.

Cuadro C6 Análisis de ANOVA y comparaciones múltiples por el mtodo de Tukey de metales traza y metales pesados extractables (PIXE) en el suelo de invernadero después de la cosecha de acelga (*Beta vulgaris* L. var. *cicla*)

Tratamiento	Pb	Ni	Cr	Cd	Fe	Cu	Mn	Zn
1	23.3 a	35.0 a	8.3 b	21.10 d	8681 a	77.22 a	232.3 ba	80.38 a
2	12.3 a	336.7 a	80.2 b	36.23 d	8049 a	132.45 a	341.6 ba	162.65 a
3	31.5 a	582.2 a	20.2 b	204.12 bdac	8246 a	79.75 a	98.9 ba	107.90 a
4	293.2 a	27.5 a	20.7 b	378.62 bac	8287 a	60.10 a	107.2 ba	98.32 a
5	340.3 a	264.3 a	55.2 b	118.62 dc	6928 a	57.03 a	92.0 ba	109.02 a
6	237.8 a	475.3 a	26.5 b	96.62 dc	6863 a	35.85 a	82.4 b	95.70 a
7	457.0 a	32.3 a	16.0 b	494.68 a	7076 a	60.30 a	73.1 b	112.10 a
8	439.1 a	389.1 a	100.2 b	370.90 bac	9221 a	69.08 a	113.2 ba	86.53 a
9	434.5 a	620.7 a	81.3 b	228.98 bdac	7646 a	29.35 a	229.2 ba	59.78 a
10	28.6 a	45.8 a	54.8 b	25.60 d	7767 a	49.70 a	220.7 ba	54.00 a
11	11.8 a	313.1 a	48.8 b	293.52 bdac	7401 a	44.85 a	184.6 ba	55.83 a
12	37.4 a	607.4 a	38.7 b	127.35 dc	7462 a	33.85 a	68.7 b	71.67 a
13	317.9 a	18.9 a	195.9 ba	99.85 dc	8831 a	43.90 a	200.4 ba	83.62 a
14	80.3 a	246.9 a	153.8 b	126.17 dc	6529 a	91.45 a	209.2 ba	100.53 a
15	210.1 a	455.7 a	376.4 ba	437.70 ba	6985 a	92.12 a	395.1 ba	93.37 a
16	251.6 a	28.2 a	266.5 ba	146.57 bdc	6677 a	93.10 a	223.3 ba	101.52 a
17	185.9 a	159.8 a	352.6 ba	211.30 bdac	6369 a	91.45a	385.1 ba	178.25 a
18	422.2 a	709.7 a	667.1 a	298.98 bdac	9105 a	94.95 a	690.6 a	91.65 a
DMS	596.46	716.29	508.98	294.45	10657	121.69	601.92	176.49
CME	53056.87	76517.60	38636.02	12930.90	16936958.3	2208.55	54032.95	4645.63
C.V.	108.68	93.09	138.05	55.06	53.63	68.41	105.94	70.39
ANOVA SS	1888224.1	3866067.5	2055858.5	1413518.3	55285069.3	51180.05	1659120.44	70467.54

DMS = Diferencia Mínima Significativa; CME: Cuadrado Mínimo del Error; C.V.= Coeficiente de Variación.

APÉNDICE D

Cuadro D1. Contenido de metales traza extractables (DTPA)

CLASE	Fe ²⁺	Cu ²	Mn ²⁺	Zn ²⁺
	mg kg ⁻¹			
Deficiente	< 2.5	< 0.2	< 1.0	< 0.5
Marginal	2.5-4.5	-----	-----	0.5-1.0
Adecuado	> 4.5	> 2.5	> 1.0	>1.0

Fuente: Viets y Lindsay, 1973.

Cuadro D2. Concentración de metales traza y metales pesados totales en suelos en mg kg⁻¹

Elemento	Rangos Normales (Allaway, 1968)	Rangos Normales (Bowen, 1979)	Potencialmente Peligrosos (Kabata-Pendians y Pendias, 1984)
Cu	2-200	2-250	60-125
Mn	100-4 000	20-10 000	1 500-3 000
Zn	10-300	1-900	70-400
Cd	0.01-7	0.01-2	3-8
Cr	5-3 000	5-1 500	75-1 00
Co	1-40	0.5-65	25-50
Ni	10-1 000	2-750	100
Pb	2-200	2-300	100-400

Fuente: Allaway, (1992); Cajuste *et al.*, (1991)

Cuadro D3. Concentración de metales traza y metales pesados en tejido vegetal en mg kg⁻¹

Elemento	Rangos Normales (Bowen, 1979)	Potencialmente Peligrosos (Kabata-Pendians y Pendias, 1984)	Potencialmente Peligrosos (McNichol y Beckett, 1985)
Cu	5-20	20-100	5-64
Mn	20-1 000	300-500	100-7 000
Zn	1-400	100-400	100-900
Cd	0.01-2.4	5-30	4-200
Cr	0.03-14	5-30	2-18
Co	0.02-1	15-50	4-40
Ni	0.02-5	10-100	8-220
Pb	0.2-20	30-300	-

Fuente: Allaway, (1992).

Cuadro D4. Contenido de elementos traza y metales pesados en tejido vegetal en mg kg⁻¹

Elemento	Rangos Normales Fitotóxico		Rangos Normales Fitotóxicos	
	(Allaway, 1968)		(Davis <i>et al.</i> , 1978)	
Cu	---	---	---	---
Mn	---	---	---	---
Zn	---	---	---	---
Cd	0.1-0.8	5-30	0.05-0.2	3-30
Cr	---	---	0.1-0.5	5-30
Co	0.05-0.5	15-30	0.02-1.0	15-30
Ni	1	---	0.1-5.0	10-100
Pb	0.1-10	---	5.0-10.0	30-300

Fuente: Carrillo y Cajuste, 1992.

Cuadro D5. Contenido de elementos traza y metales pesados en tejido vegetal en mg kg⁻¹

Elemento	Rangos Normales Potencialmente Peligrosos		Rangos Normales Potencialmente Peligrosos	
	(Chaney, 1983)		(Jones, 1991)*	
Cu	3-20	25-40	7-30	31-50
Mn	15-150	200-400	31-100	100-250
Zn	15-150	500-1 500	21-70	71-100
Cd	0.1-1	5-700	---	---
Cr	0.1-1	20	---	---
Co	0.1-03	25-100	---	---
Ni	0.1-5	50-100	---	---
Pb	2-5	---	---	---

*Medicago Sativa L

Fuente: Carrillo y Cajuste, 1992.

Cuadro D6. Propiedades químicas de los metales trazay metales pesados

Elemento	Grupo en la Tabla Periódica	Número Atómico	Peso Atómico	Iones	Radio Iónico
Cu	IB	29	63.54	Cu ⁺ Cu ²⁺	0.96 0.72
Mn	VIIIB	25	54.94	Mn ²⁺ Mn ³⁺ Mn ⁴⁺	0.80 0.66 0.60
Zn	IIB	30	65.37	Zn ²⁺	00.74
Cd	IIB	48	112.40	Cd ²⁺	0.97
Cr	VIB	24	52.00	Cr ³⁺ Cr ⁶⁺	0.63 0.52
Co	VIIIB	27	58.93	Co ²⁺	0.72
Ni	VIIIB	28	59.71	Ni ²⁺	0.69
Pb	IVA	82	207.19	Pb ²⁺	1.20

Fuente: Alloway, (1992)