



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACION FISICO - QUIMICA DE LOS
SUELOS DEL DISTRITO DE RIEGO DE
TECOZAUTLA, HIDALGO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

B I O L O G O

P R E S E N T A:

MANUEL HERNANDEZ QUIROZ



TESIS CON
CALA DE ORIGEN

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. CHRISTINA SIEBE GRABACH



MEXICO, D. F.

1998

FACULTAD DE CIENCIAS
SECCION ESCOLAR

261619



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

M. en C. Virginia Abrín Batule
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis: "Caracterización físico-química de los suelos del Distrito de Riego de Tecozautla, Hidalgo" realizado por Manuel Hernández Quiroz con número de cuenta 8436549-7, pasante de la carrera de Biología. Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis
Propietario DRA. CHRISTINA SIEBE GRABACH
Propietario M. EN C. SILVIA MA DE LA PAZ SANCHEZ BELTRAN
Propietario BIOL. CLAUDIA VALLEJO ALBARRAN
Suplente DRA. SILKE GRAM HEYDRICH
Suplente DR. JORGE ENRIQUE GAMA CASTRO

Christina Siebe
Silvia Sanchez Beltran
Claudia Vallejo Albarran
Silke Gram
FACULTAD DE CIENCIAS
Jorge Enrique Gama Castro

Consejo Departamental de Biología

[Signature]
M. EN C. ALEJANDRO MARTINEZ MENA
SECRETARIO

Agradecimientos

Agradezco especialmente a mi asesora de tesis la Dra. Christina Siebe por su estímulo y apoyo, por su enorme entusiasmo y dedicación.

La presente investigación fué posible gracias a las siguientes instituciones por el uso de sus instalaciones y servicios: Facultad de Ciencias, Instituto de Geología con la invaluable colaboración del Departamento de Edafología, el Instituto de Geografía y el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional; el Instituto Nacional de Geografía e Informática; la Comisión Nacional del Agua y la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (antes la SARH). Asimismo, los acervos de las bibliotecas de las instituciones mencionadas.

Se agradece la gentileza de la M. en C. Silvia Sánchez Beltran por su asesoría en el desarrollo del trabajo del laboratorio. A el Dr. José Luis Palacio Prieto por su importante contribución en la elaboración de los mapas.

A la H. Comisión dictaminadora integrada por la M. en C. Silvia Ma de la Paz Sánchez Beltran, Biol. Claudia Vallejo Albarran, Dra. Silke Cram Heydrich y el Dr. Jorge Enrique Gama Castro. Así mismo se les agradece la minuciosa revisión, aportes y sugerencias que hicieron a toda la tesis.

A la Planta de Asfalto del Departamento del Distrito Federal por las facilidades prestadas y al actual Comité de la Sección 38 por su participación en los trabajos de edición.

Finalmente agradezco a todas las personas, profesores y amigos que de distinta manera motivaron y ayudaron a concluir este trabajo.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.	1
2. OBJETIVOS.	2
3. MARCO TEÓRICO	2
4. ZONA DE ESTUDIO.	
4.1. Medio físico y geográfico	4
4.1.1. Localización	4
4.1.2. Clima.	6
4.1.3. Hidrografía.	8
4.1.4. Topografía y litología.	9
a. Rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias.	
b. Aluvión.	
c. Rocas ígneas extrusivas.	
4.1.5. Suelos.	10
a. Feozems.	
b. Vertisoles.	
c. Litosoles.	
d. Xerosoles.	
e. Regosoles.	
f. Fluvisoles.	
g. Rendzinas	
4.1.6. Vegetación.	12
4.1.7. Potencial acuífero.	13
4.1.8 Agricultura.	14
4.1.9. Fertilizantes y abonos.	15
5. METODOLOGÍA.	
5.1. Método de campo.	16
5.2. Método de laboratorio.	16
5.2.1. Análisis físicos.	17
5.2.2. Análisis químicos.	18
6. DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES TIPO	20
7. RESULTADOS.	32

1. DISCUSIÓN.	
8.1. Procesos pedogenéticos dominantes.	52
8.2. Características edafocológicas.	54
8.3. Variación del contenido de metales pesados totales en el suelo.	58
8.4. Estimación de la capacidad filtro y amortiguadora en los suelos.	60
9. CONCLUSIÓN.	62
10. BIBLIOGRAFÍA.	64
ANEXO 1: Tablas de resultados.	69
ANEXO 2. Mapas de la zona de estudio: Geología, Suelos y Uso del suelo.	80

1. Introducción.

El presente trabajo forma parte de un proyecto en el que se analizan los efectos del riego con agua residual sobre la calidad del ambiente y la salud. Este proyecto se realiza en colaboración con el Instituto Nacional de Salud Pública, la Comisión Nacional del Agua y la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (antes la SARH).

Dentro del marco del proyecto, el Municipio de Tecozautla en el Estado de Hidalgo se propone como zona control, ya que es una zona agrícola, en la que el agua para riego proviene de pozos profundos. Además, presenta características litológicas, climáticas y edafológicas similares a las que prevalecen en varios de los Distritos de Riego del centro del país, en los que se riega con aguas residuales.

El mayor uso agrícola de aguas residuales se presenta en los Distritos de Riego de Chiconautla (88), Tula (03) y Alfajayucan (100) y una parte en los de Tulancingo (28), Valsequillo (30) y Ciudad Juárez (09) (tabla 9, anexo 1). En estas zonas para la producción agrícola se tiene que recurrir al riego para lograr rendimientos satisfactorios. Sin embargo, el recurso agua se ha vuelto un factor limitante, debido principalmente a la creciente demanda por el incremento demográfico y por abrirse nuevos campos de cultivos con sistemas de riego. Esto ha originado conflictos por la disponibilidad limitada del líquido para consumo humano y usos agrícolas e industriales.

Lo anterior ha obligado al uso creciente de aguas residuales para riego agrícola procedentes de áreas industriales y urbanas, atenuando dos problemáticas: el desecho del agua residual que es vertida directamente a cuerpos de agua superficiales y el mejoramiento de las condiciones de productividad de los suelos, debido al aporte de agua y nutrientes, lo que favorece el desarrollo de las regiones rurales.

El riego con agua residual en los suelos de cultivo, está generando un aumento de contaminantes y su concentración, recibiendo gran atención desde el punto de vista biológico y agrícola debido a que cada elemento opera de manera distinta y peculiar. Esto ha intensificado un debate sobre una legislación para proteger el ambiente contra efectos adversos de metales potencialmente tóxicos (Mc Grath et al., 1994). Por lo que es importante conocer el contenido natural de metales pesados en los suelos, para poder establecer límites de tolerancia congruentes, y también para monitorear el incremento de las concentraciones de metales pesados en suelos regados con agua residual.

2. OBJETIVOS.

El objetivo del presente trabajo es determinar las características de las principales unidades de suelos del municipio de Tecozautla y evaluar si los suelos del Distrito de Riego de Tecozautla pueden considerarse como zona control dentro del marco de un proyecto más amplio que estudia la acumulación de metales pesados en suelos regados con aguas residuales.

Objetivos específicos:

- Delimitar las principales unidades de suelo y ubicar los perfiles tipo.
- Realizar el estudio de sus caracteres morfológicos.
- Realizar análisis físicos y químicos a los suelos.
- Determinar los contenidos naturales de metales pesados en los suelos del municipio de Tecozautla del Edo. de Hgo.

Los resultados contribuirán a la caracterización de la zona control establecida para un proyecto más amplio que estudia los efectos en la calidad del ambiente y la salud pública en zonas regadas con aguas residuales.

3. Marco teórico.

El uso del agua residual para el riego agrícola ha traído algunas consecuencias, como es la descarga creciente en los suelos de compuestos orgánicos, gérmenes patógenos y metales pesados. Entre los compuestos orgánicos se encuentran los detergentes de difícil biodegradación con la fórmula A.B.S. (alkil benzen sulfonato), los L.A.S. (alkil sulfonato lineal) o los A.O.S. (alfa olefin sulfonato de benceno). Cuando estos compuestos no son degradados rápidamente pueden disminuir la fertilidad del suelo y su productividad (Méndez-García, 1982). Entre la descarga de gérmenes, figuran por ejemplo bacterias como la *Salmonella tifosa* o las shiginelas, parásitos diversos como protozoarios (*Entamoeba histolitica*, *E. coli*, *E. disenteriae* etc.), céstodos como el cisticerco, fase larvaria de *Taenia solium* o *T. saginata*, nemátodos (*Ascaris lumbricoides*, *Trichinella spiralis* etc.) y virus.

Las descargas industriales y urbanas contienen también metales pesados. Se denominan metales pesados a aquellos elementos, cuya densidad real es mayor a 5 g/cm^3 (Barceló y Charlotte, 1989). Entre ellos se encuentran los elementos traza o micronutrientes que juegan un papel importante en la fertilidad del suelo, ya que son esenciales para las actividades biológicas y en general en todos los periodos del desarrollo. Para un buen desarrollo y crecimiento de las cosechas deben encontrarse en forma disponible y en concentraciones óptimas en el suelo (Flores-Delgadillo, 1987). Los demás son elementos no esenciales como Pb, Cd, Hg, As, Tl y U que son tóxicos, si rebasan ciertas dosis. Dependiendo si el elemento es esencial o no, puede tener dos umbrales, de deficiencia o de toxicidad, a partir de una concentración crítica (Barceló y Charlotte, 1989; Alloway, 1990).

Los metales pesados en el suelo se encuentran en forma soluble o asociados a la fase sólida del suelo en forma intercambiable, asociados a las superficies activas de la fracción coloidal, acomplejados en compuestos orgánicos, adsorbidos u ocluidos en carbonatos u óxidos de minerales y sustituyendo al Si y Al en la estructura interna (sustitución simple) de los minerales primarios y secundarios (Alloway, 1990).

Generalmente, los metales pesados de origen litológico o geogéneo (heredados del material parental) se encuentran en los suelos en formas poco solubles o disponibles, ya que forman parte de la estructura de los minerales primarios. En la tabla 1 se hace referencia a distintos tipos de roca que conforman el material parental de los suelos, presentan diferentes contenidos de metales pesados, condicionados por su composición mineralógica. Los contenidos generalmente son bajos, pero existen ciertas rocas ricas en minerales conformados por importantes cantidades de Cr (serpentinita), Zn (sfalerita), Cu (cuprita), Fe (magnetita) etc.

Tabla 1: Intervalos de elementos reportados en rocas y suelos (mg/kg) por diferentes autores.

Elemento	Rocas Igneas:					Sedimentarias:			Suelos normales*	
	Ultrabásicas	Básicas	Intermedias	Graníticas	Alcalinas	Calizas	Areniscas	Pizarras	texturas: gruesas	finas
Zn	25-100	50-200	50-100	10-100	50-200	20	30	120(<1000)	10-100(50)	100-300
Cu	10-50	10-100	30-100	5-50	5-30	5.5	30	39(<300)	5-30(20)	30-80
Ni	1000-1500	5-300	10-30	10-20	-	7	9	68(<300)	5-50(20)	50-500
Co	50-150	30-60	10-20	1-5	40-60	0.1	0.3	19	0 5-15(5)	15-30
Pb	-	1-5	2-20	5-100	2-50	5 7	10	23(<400)	5-40(15)	40-200
Cd	0.01-0.1	0.1-2	-	0.1-2	-	0.03	0.05	0.22(<240)	0 05-0.5(0.3)	0.5-3

Fuente: Para rocas ígneas silíceas (Jeffery y Hutchison, 1986); en sedimentarias (Alloway, 1990) y en suelos normales (Fiedler y Roessler, 1988).
valores entre paréntesis= medias.

*Sin influencia por actividades antrópicas.

4. Zona de estudio.

Tecoautla

“Lugar donde abunda el acre amarillo”

La ciudad de Tecozautla del Estado de Hidalgo recibió la categoría de cabecera municipal al ser erigida la ciudad de Huichapan en distrito político en 1869. Pero su origen histórico data desde 1571.

4.1. Medio físico y geográfico.

4.1.1. Localización.

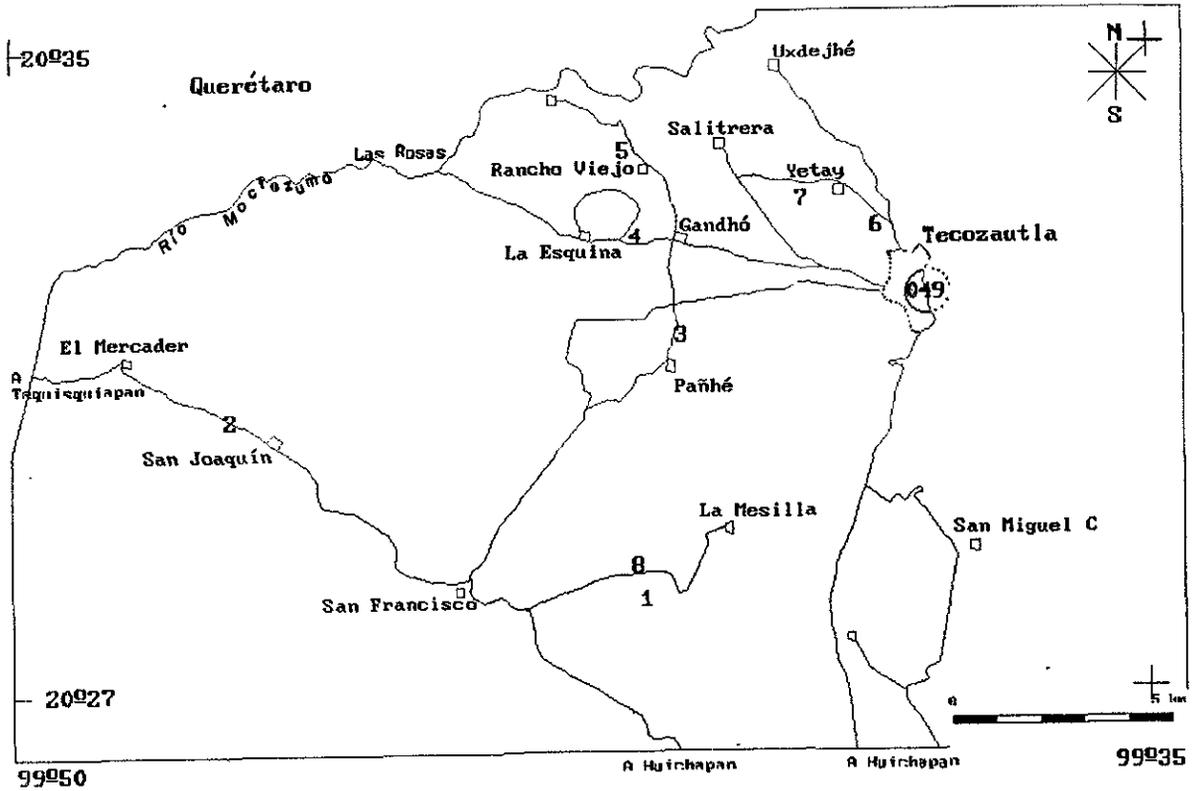
Situado al Noreste del estado de Hidalgo y representando el 2.66 % del área total de la entidad, el municipio de Tecozautla se localiza entre los paralelos 20°32' - 20°12' de latitud Norte y 90°38' - 99°37' de latitud Oeste, a una altitud de 1700 msnm. Limita al Norte con el municipio de Zimapán y el estado de Querétaro; al Sur con el municipio de Huichapan; al Este con los de Tasquillo y Alfajayucan y al Oeste con el estado de Querétaro. Los centros poblados del municipio son: la cabecera Municipal, cinco cabeceras de subsistema y 32 localidades menores (tabla 2). Sus principales comunidades son: San Miguel, San Joaquín, Aljibes, el Palmar y Ganchó (Centro Nacional de Estadística Municipal, 1988; INEGI, 1995b).

El área de observación abarca la mitad Oeste del municipio de Tecozautla; representa aproximadamente el 70 % del área municipal y sus coordenadas geográficas son 20°26' y 20°35' de latitud Norte y 99°35' y 99°50' longitud Oeste (mapa 1).

Tabla 2: Localización de las principales localidades del Municipio de Tecozautla.

Localidades principales	LATITUD		LONGITUD		ALTITUD msnm
	Grados	Minutos	Grados	Minutos	
El Mercader	20	31	99	49	2050
Bomanxotha	20	31	99	40	1760
Gandhó	20	33	99	41	1690
La Esquina	20	33	99	43	1700
La Mesilla	20	29	99	40	1890
Pañhe	20	31	99	41	1720
Rancho Viejo	20	34	99	42	1650
Salitrera	20	34	99	41	1650
San Antonio	20	32	99	43	1730
San Francisco	20	28	99	45	1880
San Miguel	20	29	99	37	1850
San Joaquín	20	30	99	46	1950
Uxdejhé	20	35	99	40	1700
Yctay	20	33	99	39	1750
Yextho	20	34	99	43	1750

(CETENAL, 1971; CETENAL, 1972).



Mapa 1: Localización de los sitios de muestreo, localidades y la red principal de caminos correspondiente a la zona de estudio de Tecozautla, Hgo.

Fuente: CETENAL, 1971
CETENAL, 1972

No de perfil:	Localidad:
1	La Mesilla I
2	San Joaquín
3	Pañhé
4	Gandhó
5	Rancho Viejo
6	El Bothó
7	Yeta y
8	La Mesilla II

049: Estación meteorológica Tecozautla.

4.1.2. Clima.

Por su ubicación geográfica y sus características topográficas, el municipio de Tecozautla presenta un clima semiseco con dos subtipos: en la parte Norte del municipio corresponde a la fórmula BS1h semiseco semicálido que cubre el 58.45 % de la superficie municipal. El BS1k semiseco templado en la porción inferior Sur y Este del municipio que cubre el 41.57 % restante (INEGI, 1985).

La estación meteorológica de Tecozautla presenta un clima que corresponde a la fórmula: BS₁ hw''(w)(e)g seco o semiárido con régimen de lluvias en verano (julio a septiembre). La precipitación media anual es de 509.5 mm y la temperatura media anual de 19.1 °C. El cociente P/T promedio de 27 es el menos seco de entre los que presentan estas características. La temperatura oscila entre 18° y 22° C anualmente y es menor de 18° en los meses más fríos. La estación más seca es en el invierno; el porcentaje de lluvia invernal es menor de 5 % de la anual. La oscilación anual de la temperatura media es extrema entre 7° C y 14° C. El mes más cálido es antes del solsticio de verano (Fig. 1).

En comparación, en la estación Centenario ubicada a 26 km en dirección Oeste de Tecozautla, con un periodo de observación de 15 años (1976-1991), se clasificó el clima de acuerdo al sistema del Dr. Thornthwaite, que corresponde a la fórmula PI-SA-TD-VA seco, con poca o ninguna demasía de agua, templado frío y con baja concentración de calor en verano (fig. 2). Estas observaciones fueron proporcionadas en el Distrito de Desarrollo Rural No. 061, Huichapan

La evaporación potencial (EP) es un índice de eficiencia térmica así como de pérdida de agua, representa una transferencia de calor y humedad del suelo y la cubierta vegetal a la atmósfera o viceversa (Dirección de Agrología, 1972). En la tabla 3 se encuentran los valores de la determinación del balance de agua de la estación meteorológica de Tecozautla. La deficiencia de agua ocurre en la mayor parte del año, donde el valor de la precipitación (P) (cm) es menor que la evapotranspiración (EP) (condición semiárida) por lo que no existe reserva de agua (HA), ni movimiento de la misma en el suelo (MHS) durante la mayor parte del año. La humedad aportada por las aisladas lluvias se pierde rápidamente o es tomada por la cubierta vegetal para cubrir sus necesidades.

El agua existe en poca demasía con el régimen de lluvias de verano, quedando de reserva, ésta se va perdiendo paulatinamente por infiltración o por evaporación y en muy poca cantidad se pierde por escurrimiento de las zonas altas al valle de Tecozautla (tabla 3).

Tabla 3.- DATOS CLIMATOLÓGICOS Y CALCULO DEL BALANCE DE AGUA EN LOS SUELOS DE TECOZAUTLA, HGO.

Estación: Tecozautla, Hgo.

Coordenadas: 20° 32' N
99° 38' O

Altitud: 1700 m.

Años: T 12 - P 17

Concepto	Clave	Valores promedio mensuales [V (cm)]												[V(a)]
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Temperatura	T°C	15.0	17.1	19.7	21.4	22.5	21.8	20.8	21.1	20.0	18.8	16.5	14.7	19.1
Precipitación	P(cm)	1.4	0.8	0.3	2.1	4.2	8.9	10.3	7.6	8.6	5.6	1.3	0.6	51.67
Índice de calor	i	5.3	6.4	8.0	9.0	9.7	9.3	8.7	8.8	8.2	7.4	6.1	5.1	92.14
Evapotranspiración potencial	EP'(cm)	4.27	5.57	7.41	8.76	9.70	9.10	8.27	8.52	7.64	6.75	5.18	4.10	
Iluminación	F	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94	
Evapotranspiración corregida	EP(cm)	4.06	5.01	7.63	9.20	10.9	10.1	9.43	9.46	7.79	6.75	4.82	3.85	89.06
Movimiento de humedad	MHS(cm)	-2.7	0	0	0	0	0	10	-1.9	8.6	-1.1	-3.5	-3.2	
Humedad almacenada	HA (cm)	0.02	0	0	0	0	0	10	8.14	10	8.85	5.33	2.68	
Demasia de agua	S (cm)	0	0	0	0	0	0	0.87	0	0.81	0	0	0	1.68
Deficiencia de agua	d (cm)	2.66	4.21	7.33	7.10	6.76	1.20	0	0	0	1.15	3.52	3.25	37.18
Evapotranspiración real	EPR(cm)	1.4	0.8	0.3	2.1	4.2	8.9	9.43	7.6	7.8	5.6	1.3	0.6	
Escurrecimiento	E	0.03	0	0	0	0	0	0.43	0.22	0.51	0.26	0.13	0.06	

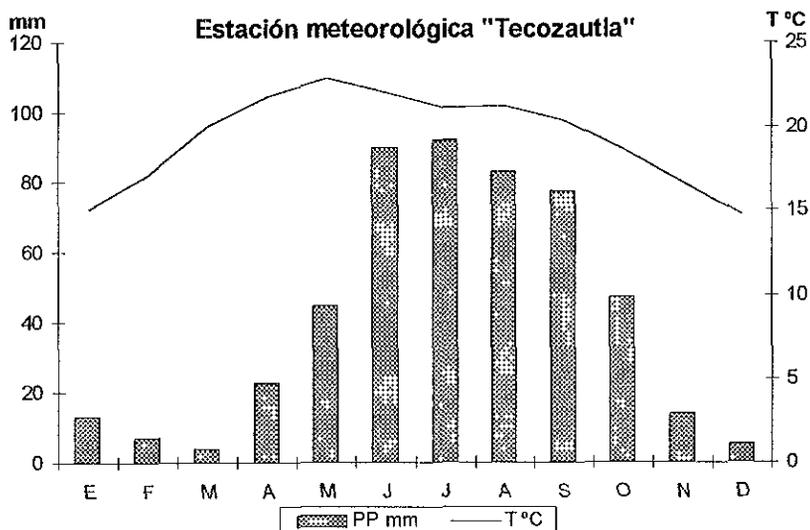


Fig. 1: Climograma de la estación meteorológica Tecozautla (Datos de García, 1988).

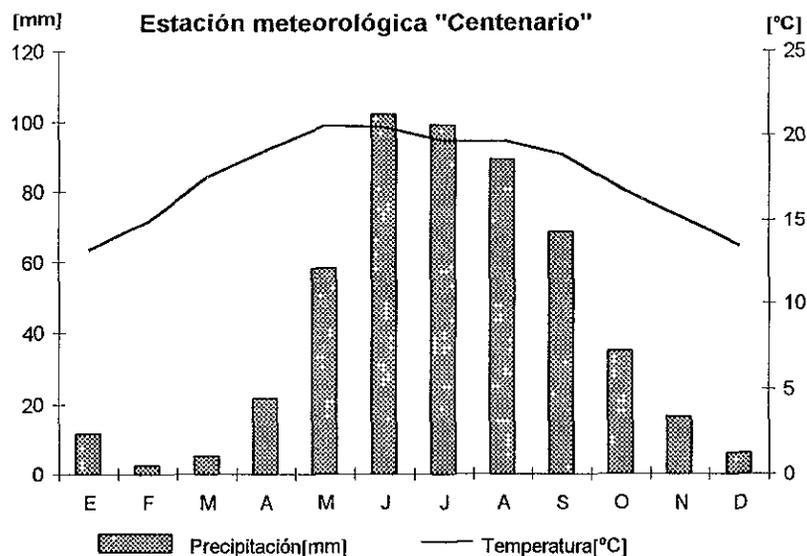


Fig. 2: Climograma de la estación meteorológica Centenario (Datos de García, 1988).

4.1.3. Hidrografía.

El municipio pertenece a la región hidrológica Pánuco (RH26). Es cruzado por el río Tecozautla tributario del río Moctezuma, que cubre el 56.88 % de la superficie municipal, está constituido por varios afluentes, al Oeste del municipio por los ríos San Francisco, Higuierillas, Peña Colorada, Yonte y El Gato; al Este: La Cruz, La Nieta y El Medhó. Otros afluentes dentro de la zona son: el Hondo, Los Pilares, San José y La Higuera que conforman el río San Juan tributario del río Moctezuma con 25.62 % de la superficie municipal. El río Tula con 16.54 % de la superficie municipal sirve de límite estatal: al Norte con el municipio de Zimapán y al Este con los de Tasquillo y Alfajayucan (INEGI, 1995a).

El río Moctezuma sirve de límite político estatal con el estado de Querétaro, es de carácter perenne y su cuenca ocupa una superficie de 19 793.60 km² dentro del estado de Hidalgo, con un volumen anual de escurrimiento de 1 561.564 millones de m³ observado en un periodo de 15 años (1957-74) (DGG, 1983).

4.1.4. Topografía y litología.

El municipio forma parte del llamado Eje Neovolcánico que cubre la porción Sur del estado de Hidalgo. Su relieve está integrado por mesetas disectadas y de gran extensión, llanuras, lomeríos, valles y algunas elevaciones (tabla 4) (CETENAL, 1971; CETENAL, 1972; CETENAL, 1974a).

La provincia del Eje Neovolcánico, está constituida predominantemente por rocas volcánicas Terciarias y Cuaternarias (brechas, tobas y derrames riolíticos, intermedios y basálticos), de composición y textura variada:

a. Rocas sedimentarias y volcano-sedimentarias:

Arenisca - conglomerado (ar-cg): Unidad constituida por alternancia rítmica de rocas que se formaron por litificación de cualquier tipo de sedimento (clásticas); en este caso continental del Terciario Superior. La arenisca es de color pardo claro de grano fino y matriz arcillosa y el conglomerado contiene estratos de caliza, margas y rocas extrusivas ígneas, cuyas formas varían de subangulosas a redondeadas. Yace en forma discordante sobre rocas cretácicas y a la formación Atotonilco el Grande. Se presenta morfológicamente como mesas y lomeríos de bajo relieve; aflora al Noreste de Tecozautla en las proximidades de Banzhá y Riito (INEGI, 1992).

Conglomerado (cg): Depósito clástico continental del Cuaternario, consiste en un conglomerado brechoide de piedemonte poco compactado, con fragmentos angulosos de andesita de matriz arenosa gruesa. Descansa de manera discordante sobre rocas ígneas Terciarias, se presenta en forma de abanicos aluviales y aflora al Suroeste de San Francisco (INEGI, 1992).

b. Aluvión:

Aluvial (al): Unidad constituida por depósitos clásticos transportados y depositados (alocotono), no consolidados. Contiene gravas, arenas, limos y arcillas provenientes de las rocas preexistentes al Cuaternario. Se presenta como abanicos y planicies aluviales y como rellenos de valle. Se encuentran en San Joaquín, al Sur de San Francisco, y al Noreste de Yetay, entre otras localidades (INEGI, 1992).

c. Rocas ígneas extrusivas:

Toba ácida (T): unidad correspondiente al Terciario Superior, perteneciente a la Toba Don Guinyó constituida por tobas riolíticas y dacíticas. Presentan un intemperismo que va de somero a profundo y el fracturamiento en algunos afloramientos es moderado y en otros intenso. Yace discordante sobre rocas sedimentarias cretácicas y subyace a la unidad de basaltos - brecha volcánica básica de la formación San Cristóbal. Está representada morfológicamente por mesetas de extensión considerable. La unidad se explota para obras hechas de piedra y acabados. Aflora al Sur de Tecozautla en La Mesilla, entre otras localidades (INEGI, 1992).

Basalto (B): Unidad correspondiente al Terciario Superior, constituida por colados basálticos (ricos en olivinos y piroxenos) y andesitas. Son de color gris claro a negro y cuando se intemperizan cambian a pardo rojizo. El grado de fracturamiento e intemperismo va de moderado y somero a intenso y profundo. Pertenece a las formaciones Atotonilco el Grande y Tarango. Sobreyacen en forma discordante, a las rocas clásticas Terciarias. Morfológicamente está representado por mesetas disectadas, aflora en las localidades de Salitrera, en San Francisco, al Norte y Este de Tecozautla entre otros (INEGI, 1992) (mapa 2, anexo 2).

Tabla 4: Principales topoformas cerriles en la zona.

	Altitud msnm.	Longitud O		Latitud N	
		Minutos	Grados	Grados	Minutos
Cerro Frio	2 490	29	20	99	50
Cerro La Cruz	2 420	25	20	99	46
Cerro El Picudo	2 230	28	20	99	48
Cerro San Pedro	2 050	32	20	99	46
Cerro El Ratón	2 000	31	20	99	44
Cerro El Cangrejo	1 960	27	20	99	45
Mesita El Pulento	1 800	33	20	99	44
Cerro Tecozautla	1 800	33	20	99	38

Tomado de: INEGI, 1995a.

4.1.5. Suelos.

Los suelos dominantes en la zona de estudio (tabla 5), cubren un área de 39.991.1 ha de la superficie total municipal 57,560.0 ha y se clasifican de acuerdo a la FAO (1974) como:

- a) Feozems (H).- Son suelos melanizados con una capa superficial rica en materia orgánica y nutrientes. Están dedicados a labores agrícolas y pecuarias. Son los más importantes en la zona y se dividen por sus características en:
 - i) Feozems háplicos (Hh).- Con poca diferenciación entre horizontes.
 - ii) Feozems lúvicos (Hl).- Con una capa de acumulación de arcillas.
 - iii) Feozems calcáricos (Hc).- Con carbonato de calcio en todos sus horizontes.

Abarcan una superficie total de 27,479.7 ha la cual representa aproximadamente el 69 % del total del área de estudio

- b) Vertisoles pélicos (Vp).- Son suelos que contienen arcillas expandibles del grupo de las montmorilonitas con la característica que en época seca se contraen, tornando a los suelos duros, masivos y sufren de agrietamientos. En época de lluvia se hidratan, expandiéndose y volviendo a los suelos lodosos, fuertemente adhesivos y plásticos. Sigue en importancia al suelo Feozem. Se les encuentra en llanuras y valles generalmente dedicadas a la agricultura por ser suelos muy fértiles. Representan el 15 % del total de la superficie con 5,893.3 ha en Tecozautla (INEGI, 1992).

- c) Litosoles (I).- Son suelos someros que están sobre roca o limitados por caliche. Se localizan en parte de la sierra y en topofomas cerriles, soportando una vegetación de matorral crasicaule con subinerme y matorral desértico rosetófilo. Se extienden en aproximadamente 3,529.5 ha ocupando el 8.8 % de la zona (INEGI, 1992).
- d) Xerosoles (X).- Se presentan en zonas estepáreas más áridas, de varias formas intermedias, pueden presentar horizontes con yeso asociado con caliza, materia orgánica del 1 al 2 %. Representa el 3.3 % de área con 0,389.8 ha (INEGI, 1992).
- e) Regosoles (R).- Son suelos poco desarrollados formados a partir de materiales no consolidados; en la zona sobreyacen a material endurecido por la cementación de carbonato de calcio que se conoce como caliche fase petrocálcica. Aproximadamente ocupan el 3 % del área total (INEGI, 1992).
- f) Fluvisoles (J).- Son suelos aluviales, fértiles, de gran interés agrícola, representa sólo el 1% del área total (INEGI, 1992).
- g) Rendzinas (E).- Se les localiza en una pequeña zona en las topofomas cerriles al NE de Tecozautla asociados con Regosoles calcáricos y Litosoles, limitados por caliche o roca. Soportan una vegetación de matorral crasicaule con subinerme y matorral desértico rosetófilo. Representan aproximadamente el 0.48 % del total de la superficie en la zona (INEGI, 1992).

Los nombres de las unidades de suelo, están dados de acuerdo a la cartografía existente (CETENAL, 1974a; CETENAL, 1974b; CETENAL, 1977) (mapa 3, anexo 2). Recientemente FAO (1988) ha renombrado y actualizado conceptos de las diferentes unidades de suelo, por lo que éstas unidades son conocidos actualmente cómo: Phaeozem (Feozem), Leptosoles (Litosoles), Calcisoles y Gypsisoles (Xerosoles), Leptosoles rendzicos (Rendzinas).

Tabla 5: Localidades de Tecozautla y sus principales tipos de suelo con su correspondiente unidad de material o roca basal.

LOCALIDAD	MATERIAL O ROCA BASAL	SUELO
	BASALTO	
SE de Tecozautla		Vp + Hh con fase gravosa
Uxdejé		Vp + Hh
Yctay		Vp + Hh con fase gravosa profunda
Riito		Hc, Rc con fase petrocálcica.
N de Rancho Viejo		Vp, Xh.
	TOBA	
S y E de Tecozautla		Re gravoso
San Joaquín		Hh con fase petrocálcica
San Francisco		Hh con fase dúrica a menos de 50 cm, Vp.
La Esquina		Regosoles y Xerosoles sobre la mesa.
La Mesilla		Xh con fase lítica a 50 - 100 cm de prof. ; Hl en la parte sur.

Continúa

LOCALIDAD	MATERIAL O ROCA BASAL	SUELO
	ARENISCAS	
La Esquina		Hh + Re
San Antonio		Hh, pequeña unidad de Vp al SO
Pañhe		HI y Hh, Re al sur.
La Esquina		Hh con fase dúrica, Vp franja delgada al rededor de la mesa.
Rancho Viejo		Hh
Salitrea		Hh con fase dúrica
Gandhó		Hh y HI + Vp.
	ARENISCA Y ALUVIÓN	
Riito		Vp
	ALUVION	
San Francisco		Je
San Joaquín		Vp dúrico, Hh con fase petrocálcica.
Yetay		Hc, Vp.
S de San Joaquín		Hh con fase dúrica.
	CONGLOMERADO	
	Tipos: V: Vertisol.	subtipos: p: pélico.
	H: Feozem.	h: háplico
	H: Feozem	c. calcárico
	R: Regosol	e: éutrico
	X. Xerosol.	
	J: Fluvisol	

Fuente. CETENAL, 1974a, CETENAL, 1974b; CETENAL, 1977.

4.1.6. Vegetación.

El matorral crassicaule es la vegetación más representativa de la región, conformado por asociaciones vegetales, que dan lugar a cuatro tipos fisionómicos distribuidos en áreas diferentes dependiendo del tipo de especies dominantes: el tipo cardonal (Ca) lo caracterizan las cactáceas de tallo suculento que le dan una fisionomía distintiva. El matorral subinerme (Ms) se diferencia del matorral espinoso (Me) por contener a simple vista, 50% de plantas sin espinas; abarca aproximadamente el 40% del área en la zona y se desarrolla generalmente en suelos de tipo Feozem háplico y Vertisol pélico. Es un matorral abierto con muchos representantes florísticos entre los que destacan los huizaches (*Acacias*), mezquites (*Prosopis*), mimosas (*Mimosa biuncifera*) y palmas (*Yucca spp*). Se localiza principalmente en las partes bajas de la sierra, en lomeríos y llanuras, principalmente en suelos someros. El matorral subinerme (Ms) se encuentra en la mayor parte del área, asociado con algunas formas de *Stenocereus sp.* o el garambullo (*Mgrtillocactus geometrizans*) o con fisionomía de nopatera (dominancia de nopales *Opuntia sp*) (mapa 4, anexo 2) (INEGI, 1992).

Los pastizales son una asociación constituida por gramíneas que pueden existir por dos causas: de forma natural (Pn), estos pastos cubren una pequeña zona al SO de Tecozautla, y los de tipo inducidos (Pi), que están distribuidos en pequeñas zonas antrópicas por la introducción de fuego o en terrenos agrícolas en abandono. Generalmente estos pastos se utilizan en pastoreo, si son sobreexplotados provocan la disminución de pastos palatables, iniciando posteriormente un proceso de erosión hídrica principalmente (Ehf(m)), proceso que abarca aproximadamente el 1% del área total y va de moderado a fuerte (mapa 4) (INEGI, 1992).

Los datos porcentuales proceden de la cartografía existente correspondiente al Uso del Suelo CETENAL, 1973, CETENAL, 1974c y CETENAL, 1975 (mapa 4, anexo 2). Después de cinco años los datos de vegetación y Uso de Suelo son de baja confiabilidad (J.E. Gama-Castro, comunicación escrita, 23/2/98).

4.1.7. Potencial acuífero.

Los principales acuíferos subterráneos de la zona están contenidos en sedimentos Terciarios continentales constituidos de aluviones, basaltos fracturados, tobas y depósitos lacustres. En la región de Tecozautla se tiene registrado hasta 1970 cómo uno de los tres tipos de veda que establece la SARH para el uso de los recursos hidráulicos subterráneos, que es, la veda elástica o zona subexplotada, que permitió la explotación para todos los usos, siendo factible el incremento en el volumen de extracción. Esto fue de vital importancia para el valle, ya que por su topografía resulta imposible la construcción de aprovechamientos superficiales.

Para 1991 se determinó su condición geohidrológica como sobreexplotado y la zona como de veda rígida, ya que el volumen de recarga estimado era de 28 millones de m³ y el de extracción alcanzó los 27.5 millones de m³, contando con 55 pozos de bombeo. La baja de precipitación registrada en los últimos años ha contribuido a aumentar hasta la fecha el número de pozos en operación (78), disminuyendo los caudales de bombeo en un 30 %. Los niveles de bombeo están siendo abatidos en el orden de los 20 m en promedio, en un tiempo de 5 años (SARH, 1993).

Las propiedades químicas de las aguas subterráneas varían mucho más que las superficiales, haciendo imposible determinar un tipo de agua característico del valle de Tecozautla. Según los parámetros para evaluar la calidad de agua de riego (Richards, 1982) de los análisis de agua de pozo del valle de Tecozautla que se presentan en la tabla 6, en forma general se puede decir (excepto para el pozo El Geisser que son aguas de tipo hidrotermal), que su conductividad eléctrica es satisfactoria para el riego (menor de 750 μScm^{-1}), aún cuando los cultivos sensibles pueden ser afectados cuando se encuentren en un rango de 250 a 750 μScm^{-1} . Son aguas bajas en sodio, pudiendo usarse para el riego de la mayoría de los cultivos, con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos en sodio intercambiable. Según Jones y Wolf (1984), el valor de pH de 7.78 a 8.22 se encuentra en un rango normal. Los principales cationes son el calcio y el magnesio, que en predominio disminuyen el peligro de sodificación. El contenido de magnesio en Gandhó se encuentra en una concentración alta (96.16 mmol dm⁻³) clasificándose de mala. Los principales aniones son los cloruros y los sulfatos. Los cloruros se encuentran en concentraciones altas (>10 mmol dm⁻³) y las aguas se clasifican como inadecuadas para riego (Jones y Wolf, 1984).

Tabla 6: Análisis de aguas de riego de pozos del valle de Tecozautla.

TIPO DE MUESTRA	El Riithó	Bomaxotha	Pañhé	Banzhá	Gandhó	Geisser
Dureza total (mg/l).	88.32	115.20	99.84	115.20	188.16	72.96
Conductividad (μScm^{-1}).	290	220	230	260	460	930
Sodio (mmol dm^{-3}).	3.05	1.75	1.93	2.16	2.69	10.95
Cloruros (mmol dm^{-3}).	17.16	9.36	12.48	17.16	24.96	137.14
Sulfatos (mmol dm^{-3}).	12.49	0.00	0.00	0.00	57.06	88.89
Fosfatos solubles (mmol dm^{-3}).	0.49	0.52	0.33	0.65	2.10	0.72
Calcio (mmol dm^{-3}).	42.24	53.76	38.40	61.44	96.00	19.20
Magnesio (mmol dm^{-3}).	46.08	61.44	61.44	53.76	96.16	53.76
Pot. H. (unidades).	8.22	8.04	8.12	7.98	7.78	9.22
Relación de absorción de Sodio (RAS).	3.24	1.63	1.93	2.01	1.96	12.81

Fuente: SARH, 1993.

4.1.8. Agricultura.

Agricultura de temporal: la agricultura de temporal se desarrolla en 9,219.4 ha, representando aproximadamente el 23% de la zona de estudio, principalmente en suelos someros de pendiente moderadamente inclinados a fuertemente inclinados que presentan pedregosidad. Se siembran principalmente cultivos básicos como son el maíz y el frijol. El uso de fertilizantes, estiércol (gallinaza) y pesticidas se relega a las épocas de lluvia para su mejor aprovechamiento (SARH, 1993).

Agricultura de riego: en 1993 se concertó el proyecto Tecozautla, Hgo. con la participación de productores regionales, personal técnico del área política y del Distrito de Desarrollo Rural No. 061, Huichapan. Se definió el área del proyecto en el valle de Tecozautla, consistiendo de 6,447.0 ha (SARH, 1993).

La zona de estudio cuenta con 43 unidades de riego por bombeo; la mayoría de los pozos se han perforado en los últimos cinco años, lo que ha permitido abrir nuevas tierras para la agricultura con un incremento relativo equivalente a 8.6 % de taza media anual y que benefician a 2,347.5 ha. Es decir, el área total de agricultura de riego está representada dentro de la zona, de las cuales 724.55 ha son de tipo ejidal y 1,748.99 ha son de pequeña propiedad.

Los tipos de cultivo se definieron en base a que permitieran una comercialización inmediata en el mercado local y regional, con una mayor utilidad neta por hectárea, excluyendo cultivos de autoconsumo como el maíz y el frijol. En la tabla 7 se presentan los principales cultivos con su demanda anual de láminas de riego.

Tabla 7: Demanda anual de láminas de riego en miles de m³ para una superficie de 100 ha para diferentes cultivos en el municipio de Tecozautla, Hgo.

Cultivo	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vol. Total
Calabacita	0	12	22.50	22.50	0	5.20	7.20	6.80		4.48	5.20	4.80	91
Jitomate	0	0	15.44	28.95	52.11	38.60	0	22.80	29.92	35.20	22.88	0	245.90
Tomate	0	0	11.36	21.30	38.34	28.40	0	10.66	13.94	16.40	10.66	0	151.06
Cebolla	0	6.05	15.73	26.62	33.88	0	0	0	4	8.50	9	10	113.78
Maíz	0	0	0	14.40	30	32.40	30	0	3.25	5	5	4.50	124.55
Frijol	0	6.64	16.60	14.11	0	2.60	4.60	3.60	0	1.80	2.55	1.95	54.45
Pepino	0	0	5.90	11.80	16.52	0	0	4.56	7.60	6.46	0	0	52.84
Ajo	9.60	12	18.40	18.40	0	0	0	0	0	0	5.60	8	72
Alfalfa	7.77	11.10	18.87	24.42	33.30	31.08	31.08	31.08	24.42	18.87	13.82	11.10	256.91
Brócoli	1.12	0	0	1.40	2.52	2.52	2.10	0	0	1.68	1.82	1.82	14.98
Frutales	0.21	0.35	0.70	1.26	2.31	2.24	2.31	1.96	1.05	0.56	0.35	0.21	13.51
total	18.70	48.14	125.50	185.16	208.98	143.04	77.29	81.46	84.18	99.27	76.88	42.38	1119.98

Fuente: SARH, 1993.

Demanda anual por ha = 11,905 m³/Ha.

4.1.9 Fertilizantes y abonos.

Se recurre en su mayoría al abono orgánico, sobre todo al estiércol de gallinaza que coadyuva a abatir la deficiencia de fósforo en los suelos. No se emplean formulaciones específicas de fertilizantes para cada cultivo, es de acuerdo a los requerimientos del mismo.

Tabla 8: Fórmulas de fertilizantes propuestas para cada cultivo:

	N	P	K
Ajo	140	60	00
Brócoli	501	115	00
Calabacita	120	80	00
Cebolla	240	80	00
Frijol	60	40	00
Jitomate	140	80	00
Maíz	200	60	00
Pepino	100	80	00
Tomate de cáscara	120	40	00

Fuente: Encuestas a nivel productor SARH (1993).

5. METODOLOGIA

5.1. Método de campo.

Como primera fase con la ayuda de la cartografía existente (CETENAL, 1971; CETENAL, 1972; CETENAL, 1974a; CETENAL, 1974b; CETENAL, 1977), se procedió a interpretar y delimitar sitios dentro del municipio de Tecozautla que presentaran litologías y posiciones topográficas distintas con diferente tipo de suelo. Se realizó un recorrido en la zona para localizar las unidades cartográficas definidas y tener una visión de conjunto de la región. Con ayuda de algunos sondeos rápidos con la barrena se precisó el sitio de muestreo y se procedió a realizar los perfiles tipo, uno por cada unidad cartográfica (mapa 1).

La forma del perfil fue rectangular dejando tres paredes verticales y tomando en cuenta la posición del sol para poder observar bien el perfil y sus horizontes el mayor tiempo posible, sin sombras y sin perturbar; la cuarta pared inclinada y escalonada para facilitar la excavación. La profundidad de cada perfil fue en medida de lo permitido por las características de cada suelo y hasta llegar al material o roca basal. Una vez abierto el perfil se procedió a la identificación de los diferentes horizontes y a la descripción de sus características, realizando las anotaciones correspondientes en una ficha de descripción (Siebe-Grabach et al., 1996). Después de la descripción, se procedió a la toma de muestras alteradas, depositándolas en bolsas de plástico, e inalteradas con cilindros de 100 ml (4 por horizonte).

Para cada horizonte la descripción comprendió las siguientes variables (Siebe-Grabach et al., 1996): color, estructura, textura, densidad aparente, porosidad, densidad de raíces, estabilidad de agregados, carbonatos y pedregosidad. Se describieron todo tipo de rasgos pedológicos observables y detalles que revistieran de importancia, con vista a la interpretación del perfil.

5.2. Método de laboratorio

Las muestras se secaron al aire a temperatura ambiente sobre papel. Ya secas se procedió a romper y moler los agregados con un mazo de madera, se pasaron por un tamiz de 2 mm de abertura, y se colocaron de nuevo dentro de sus bolsas con su respectiva tarjeta de identificación. De la muestra ya tamizada se tomaron 100 g aproximadamente, se molieron finamente en un molino de rocas con envase de carburo de tungsteno para evitar contaminaciones que pudieran afectar la determinación de metales pesados.

En cada análisis químico se trabajó con un testigo sin suelo y una muestra patrón, muestra cuyos valores eran conocidos, con el fin de detectar una posible contaminación de reactivos, errores en la preparación o debido al mal funcionamiento del equipo.

A continuación se describen los procedimientos de análisis:

5.2.1. Análisis físicos:

Permeabilidad (método de cilindro).- Se midió la velocidad de infiltración (K [cm/h]), en un área conocida (cilindro) con suelo bajo condiciones de saturación y una carga constante, midiendo el índice de flujo de equilibrio (Palmer y Troch, 1977).

Densidad real (técnica con picnómetro).- Se determinó gravimétricamente en base al peso de la partícula por unidad de volumen (Mg/dm^3) (Black, 1965; Donahue, 1977; Buckman y Brady, 1991).

Densidad aparente (método del cilindro).- Se determinó gravimétricamente en muestras inalteradas (cilindros de 100 ml) secadas a 105 °C hasta peso constante y relacionando el peso del suelo seco con el volumen de la muestra (Mg/dm^3) (Schlichting y Blume, 1966).

Porosidad y curva de retención de agua.- Se determinó gravimétricamente en muestras inalteradas de suelo contenidas en cilindros de 100 ml y saturadas con agua (pF0), desaguándolas gradualmente aplicando fuerzas de succión (diferentes pF) equivalentes a los siguientes diámetros de poro (Schlichting y Blume, 1966):

ϕ poro:	pF	Presión: [bar]
>1000 μm	0	0.00098
1000	0.6	0.0039
10 - 50	2.0	0.1
10	2.5	0.3
1	3.5	3.0

Textura (método de Bouyoucos basado en la ley de Stokes).- La textura del suelo se determinó de acuerdo con el porcentaje de las partículas de tamaño de arena, limo y arcilla que lo componen, libres de agentes cementantes y floculantes como la materia orgánica, que se eliminó oxidándola con peróxido de hidrógeno (H_2O_2 al 8%), destrucción de carbonatos por disolución con ácido clorhídrico (HCl al 10%), lavando por sifoneo para quitar el exceso de cloruros y de yeso por su relativa alta solubilidad en agua destilada (Bouyoucos, 1963).

5.2.2. Análisis químicos:

pH en CaCl₂.- Las medidas se realizaron en un extracto de suelo seco y tamizado en 25 ml de una solución de CaCl₂ 0.01 M (relación 1:2.5), con un potenciómetro WTW con electrodo combinado (platino y vidrio) (van Reeuwijk, 1992).

Sales solubles.- El método consiste en la extracción de las sales solubles que se hallan disueltas en la solución del suelo, en equilibrio con las sales adsorbidas por los coloides del mismo. El procedimiento comprende la preparación de una pasta saturada, adicionando a una muestra de 250 g de suelo tamizado agua destilada hasta alcanzar la saturación. Utilizando una bomba de vacío se extraen posteriormente los extractos de suelo (Richards, 1982).

En los extractos de suelo se hicieron las siguientes determinaciones:

Conductividad eléctrica (C.E.)- Se midió en mScm^{-1} usando un puente de conductividad eléctrica (Philips PR 9501) (Richards, 1982).

Cationes solubles.- El calcio y el magnesio se determinaron con espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3110 (EAA), el sodio y el potasio se determinaron por flamometría (Spectronic 400). Para eliminar interferencias e ionización las diluciones fueron preparadas con tampones de cloruro de lantano (LaCl₂) al 0.5% para Ca²⁺ y Mg²⁺ y cloruro de cesio (CsCl₂) para Na⁺ y K⁺.

Aniones solubles.- Los iones CO₃²⁻ y HCO₃⁻ se determinaron mediante una titulación volumétrica con ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0.1 N, y los Cl⁻ mediante una titulación con nitrato de plata 0.05 N. La determinación de SO₄⁼ presente en el extracto fue por gravimetría en forma de sulfato de bario (BaSO₄), que se precipita en solución ácida con ácido clorhídrico 1N.

Cationes intercambiables.- Se determinaron en extractos de suelo con acetato de amonio 1N a pH 7.0, el calcio y el magnesio por titulación volumétrica con versenato 0.01 N; el sodio y el potasio se determinaron por flamometría (Spectronic 400) (Bouwer et al., 1952; Grande, 1974).

Al³⁺ + H⁺ intercambiable.- Se determinó en extractos de suelo con KCl 1N (relación 1.7 5). En una primera valoración sobre una alícuota de 10 ml se determinó Al³⁺ + H⁺ por titulación volumétrica con hidróxido de sodio 0.01 N (NaOH) y en una segunda valoración otra alícuota, previa complejación del Al³⁺ con NaF al 4 %, para valorar sólo H⁺ (van Reeuwijk, 1992).

Yeso.- Previa disolución en agua destilada (relación suelo - agua de 1:40). Se determino mediante la medición de calcio con espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 372 (EAA). Para eliminar interferencias e ionización las diluciones fueron preparadas con tampón de cloruro de lantano (LaCl₂) al 0.5% (Nelson, en Page et al., 1982).

Fósforo (método de Olsen).- Se determinó colorimétricamente en extractos de bicarbonato de sodio (NaHCO_3) 0.5 M a pH 8.5, previa complejación con molibdato de amonio, y utilizando ácido ascórbico como reductor (Bray y Kurtz, en Black 1965; Jackson, 1982).

Nitrógeno Total (Método de Kjéldahl modificado).- Oxidación previa de la materia orgánica con H_2SO_4 (96%) en una unidad digestora Kjeldatherm/ Turbosog/ Kjeldastat. Al término de la digestión, el medio se hace alcalino al añadir NaOH al 40 %, logrando mediante calentamiento el desprendimiento de NH_3 , el cual se recibe en ácido bórico al 4 %, formando $(\text{NH}_4)_3\text{BO}_3$. La determinación es realizada mediante la cuantificación de NH_3 , titulando volumétricamente con HCl 0.01 N (Black, 1965).

Determinación de óxidos cristalinos de Fe, Al y de óxidos libres de Mn (según Mehra y Jackson, 1960, en Schlichting y Blume, 1966). La extracción se realiza usando ditionito de sodio como agente reductor y extractante, la reacción se lleva a cabo a pH 7.3 y se usa citrato como tampón y acomplejante. El Fe, Al y Mn se determinó en los extractos mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA).

Determinación de óxidos amorfos de Fe, Al, Mn y de Si en alofano e imogolita (Según Tamm, 1922, modificado por Schwertmann, 1964, en Schlichting y Blume, 1966); extracción con oxalato de amonio a pH 3.25 y a temperatura ambiente en la oscuridad, dado que la reacción es muy sensible a la luz UV. El Fe, Mn, Al y Si se determinaron en los extractos con espectrofotometría de absorción atómica (EAA).

Determinación de carbón orgánico total (Lichterfelder); el método consiste en la oxidación del carbón orgánico por vía húmeda con dicromato de potasio a 120 °C y determinación fotométrica de la extinción de los iones Cr^{3+} , calculando el contenido de carbón orgánico a través de una curva patrón elaborada con glucosa (Schlichting y Blume, 1966).

Extracción de metales pesados (casi) totales (Zn, Cu, Ni, Co, Pb y Cd) en suelo molido fino en molino con envase de carburo de tungsteno. Extracción con agua regia ($\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 3:1$) y determinación con EAA (Schlichting et al., 1995).

4. Descripción del perfil:

Ap₁ 0-8 cm Color pardo oscuro en húmedo (10 YR 2/2), textura franco-arcillo-limosa, contenido medio de materia orgánica (3.2%), ligeramente ácido (pH 6.0 en CaCl₂), estructura de migajón que rompe a granular, mediana, moderada, densidad aparente baja (1.1 Mg/dm³), muchos poros interestriciales muy finos, densidad alta de raíces, límite más o menos uniforme y claro.

Ap₂ 8-24 cm Color pardo oscuro en húmedo (10 YR 2/2), textura franco-arcillo-limosa, contenido medio de materia orgánica (2.3%), ligeramente ácido (pH 6.0 en CaCl₂), estructura subangular blocosa, de mediana a fina, moderada, densidad aparente baja (1.2 Mg/dm³), muchos poros interestriciales muy finos, densidad media de raíces, límite uniforme y claro.

Ah 24-51 cm Color pardo oscuro en húmedo (10 YR 2/2), textura franco-arcillo-limosa, contenido medio de materia orgánica (2.3%), ligeramente ácido (pH 6.0 en CaCl₂), estructura subangular blocosa, mediana, moderada, densidad aparente mediana (1.4 Mg/dm³), muchos poros interestriciales muy finos, densidad baja de raíces, límite gradual.

C > 51 cm Color pardo opaco en húmedo (7.5 YR 3/3), estructura masiva, densidad nula de raíces.

1. Información acerca de la localidad.

a. No de perfil 2

b. Nombre del sitio: San. Joaquín, Municipio Tecozautla, Hgo.

c. Clasificación del suelo:

F.A.O.: Phaeozem verti-háplico.

U.S.D.A.:

d. Fecha de descripción: 22-10-94.

e. Descripción: Manuel Hernández Quiroz.

f. Localización: A 1 Km. de San. Joaquín por el camino de terracería que va hacia "El Mercader".

Coordenadas: U.T.M.: 418161 Long.: 99°47'11" Oeste

226769 Lat. : 20°30'05" Norte

g. Altitud: 1930 msnm.

h. Forma del terreno:

Posición fisiográfica: Fondo de valle, plano, microrelieve ninguno.

i. Pendiente: Sencilla, casi plano 0-0.5°. Exposición: NO.

j. Uso de suelo: Agricultura de temporal, tipo de cultivo anual, en este caso milpa de maíz, riego eventual bordo de abrevadero.

k. Clima: *BSIhw''(w)(e)g*: Semiseco templado, el menos seco de su tipo, precipitación media anual 516.7 mm., la temperatura media anual es de 19.1 °C. (Datos provenientes de la estación meteorológica de Tecozautla (049) a 16 km. aproximadamente de distancia, en dirección E).

2. Información general acerca del suelo.

- a. Material o roca basal: aluvial.
- b. Drenaje natural: Clase 2 (bueno).
- c. Condiciones de humedad en el perfil: Seco en la superficie y fresco a poca profundidad (>2 mm).
- d. Profundidad al manto freático: No determinada, no influye al perfil.
- e. Presencia de rocas superficiales: No.
- f. Evidencia de erosión: No apreciable.
- g. Presencia de sales o sodio: Si, superficie con costra que rompe en polígonos, bofa.
- h. Influencia humana: Cultivo.

3. Descripción breve del perfil: Perfil profundo (> 97 cm), bien drenado, de color pardo oscuro uniforme en apariencia si está húmedo; el desarrollo de su estructura es mediano a moderado. con presencia de facetas de presión-fricción, débiles de los 2 a los 50 cm; poroso y permeable, la distribución de raíces es baja en el primer horizonte, alta en el segundo y mediana en el tercero.

4. Descripción del perfil:

Ap₁ 0-2 cm Color pardo oscuro en húmedo (10 YR 2/2), textura arcillo arenosa, contenido medio de materia orgánica (2.5%), ligeramente ácido (pH 6.6 en CaCl₂), estructura subangular a laminar, de gruesa a mediana, moderada, densidad aparente baja (1.0 Mg/dm³). Se trata de una costra superficial que rompe en polígonos, de consistencia bofa., muchos poros intersticiales muy finos, densidad baja de raíces, límite claro.

Ap₂ 2-32 cm Color pardo oscuro en húmedo (10 YR 2/2), textura arcillo arenosa, bajo contenido de materia orgánica (1.8%), ligeramente ácido (pH 6.7 en CaCl₂), estructura granular a subangular blocosa, fina a mediana, débil, densidad aparente baja (1.1 Mg/dm³), presenta facetas de presión-fricción débilmente desarrolladas, muchos poros intersticiales muy finos, densidad alta de raíces, límite gradual.

Ah₁ 32-52 cm Color pardo oscuro en húmedo (10 YR 2/2), textura arcillo arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.8%), neutro (pH 7.2 en CaCl₂), estructura subangular blocosa, mediana, moderada, densidad aparente baja (1.2 Mg/dm³). Presenta facetas de presión-fricción débilmente desarrolladas, muchos poros intersticiales muy finos, densidad media de raíces, límite gradual.

Ah₂ 50->97 cm Color pardo oscuro en húmedo (10 YR 2/2), textura arcillo arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.4 %), neutro (pH 7.7 en CaCl₂), estructura subangular a angular blocosa, mediana, moderada; densidad aparente mediana (1.4 Mg/dm³). Este no presenta facetas de presión-fricción, muchos poros intersticiales muy finos, densidad nula de raíces, límite gradual.

4. Descripción del perfil:

Ap 0-17/23 cm Color pardo (10 YR 4/4), textura franco-arcillo-arenosa, contenido medio de materia orgánica (2.9%), neutro (pH 7.6 en CaCl₂) Hay presencia de carbonatos (2-10%). Estructura de terrones y bloques subangulares, mediana a gruesa, moderada, densidad aparente mediana (1.4 Mg/dm³), pedregosidad del 3% de cantos finos. Presenta manchas color café oscuro que consisten de rellenos de materia orgánica en descomposición (estiércol o residuos de cosecha anterior). Muchos poros intersticiales, densidad media de raíces, límite claro y quebrado.

Bk 17/23-24/30 cm Color pardo opaco (7.5 YR 4/3), textura franco-arcillo-arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.5%), neutro (pH 7.6 en CaCl₂). Estructura subangular blocosa, mediana, débil, densidad aparente mediana (1.4 Mg/dm³), pedregosidad < 1% de cantos finos. Presenta un pedazo de ladrillo rojo. Muchos poros intersticiales, densidad de raíces muy baja, límite claro y quebrado.

BCKw 24/30-50 cm Color pardo opaco (7.5 YR 5/3), textura franco-arcillo-arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.2%), neutro (pH 7.7 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (2-10%). Estructura masiva que rompe en subangular blocosa, mediana, fuerte, densidad aparente de mediana a alta (1.5 Mg/dm³). Presenta algunas venas verticales negras de Mn. Pedregosidad del 7%, densidad de raíces baja, límite claro y recto.

C 50- >66 cm Color pardo opaco (7.5 YR 5/3), textura franco-arcillo-arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.3%), neutro (pH 7.6 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (0-0.5%). Estructura masiva, densidad aparente alta (1.6 Mg/dm³), pedregosidad del 10% de cantos medianos a finos. Presenta algunas manchas negras de Mn de menos de 1 cm de diámetro, además de un hoyo de 10 cm de diámetro relleno de material rico en materia orgánica del lado izquierdo.

1. Información acerca de la localidad.

a. No. de perfil: 4

b. Nombre del sitio: Gandhó, Municipio de Tecozautla, Hgo.

c. Clasificación del suelo:

F.A.O.: Phaeozem háplico.

U.S.D.A.:

d. Fecha de descripción: 23-10-94.

e. Descripción: Manuel Hernández Quiroz

f. Localización: A 800 m de Gandhó por el camino de terracería que va a La Esquina

Coordenadas: U.T.M.: 427514 Long.: 99°42'04" Oeste

227184 Lat. :20°33'08" Norte

g. Altitud: 1670 msnm.

h. Forma del terreno:

Posición fisiográfica: fondo de valle, plano.

i. Pendiente: Sencilla casi plano 0-0.5°. Exposición SO.

- j. Uso de suelo: Agricultura de temporal, tipo de cultivo anual, en éste caso barbecho reciente, antes maíz, riego con agua de pozo.
- k. Clima: *BSIhw''(w)(e)g*: Semiseco templado, el menos seco de entre su tipo. Precipitación media anual 516.7 mm, la temperatura media anual es de 19.1 °C. (Datos provenientes de la estación meteorológica de Tecozautla (049) a 6 ½ km. aproximadamente, en dirección SE.).

2. Información general acerca del suelo.

- a. Material o roca basal: Arenisca.
- b. Drenaje natural: Clase 2 (bueno).
- c. Condiciones de humedad en el perfil: Seco en la superficie y fresco a poca profundidad.
- d. Profundidad al manto freático: No determinada, no influye al perfil.
- e. Presencia de rocas superficiales: No.
- f. Evidencia de erosión: No apreciable.
- g. Presencia de sales o sodio: No apreciable.
- h. Influencia humana. Cultivo.

3. Descripción breve del perfil: Perfil profundo (>62 cm), bien drenado, de color pardo oscuro uniforme en apariencia, ligeramente pedregoso. Estructura subangular blocosa, mediana. Todo el perfil es poroso y permeable, densidad de raíces es mediana hasta los 48 cm.

4. Descripción del perfil:

Ap 0-24 cm Color pardo oscuro (10 YR 2/3), textura franco-arcillo-limosa, contenido medio alto de materia orgánica (4.6%), neutro (pH 7.3 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (0-0.5%). Estructura de terrones a subangular blocosa, mediana a gruesa, moderada, densidad aparente mediana (1.3 Mg/dm³). Presenta manchas de materia orgánica fermentada (estiércol). Pedregosidad del 3%, muchos poros intersticiales, densidad media de raíces, límite recto y difuso.

Ah 24-48 cm Color pardo oscuro (10 YR 2/3), textura franco-arcillo-limosa, contenido medio de materia orgánica (2.0%), neutro (pH 7.4 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (0-0.5%). Estructura subangular blocosa a granular, fina a mediana, moderada, densidad aparente mediana (1.4 Mg/dm³). Pedregosidad del 2%, muchos poros intersticiales, densidad media de raíces, límite claro y recto.

mCw 48->62 cm Color pardo rojizo (5 YR 4/6), contenido bajo de materia orgánica (1.5%), neutro (pH 7.2 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (0-0.5%). Estructura masiva, densidad aparente alta (1.6 Mg/dm³). Presenta filamentos negros verticales de MnO.

4. Descripción del perfil:

A(p) 0-10 cm Color pardo rojizo oscuro (5 YR 3/3), textura franco-arcillo-arenosa, contenido medio alto de materia orgánica (6.6%), ligeramente ácido (pH 6.8 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (0-0.5%). Estructura granular, fina, débil, densidad aparente baja (1.0 Mg/dm³) pedregosidad del 30%, muchos poros intersticiales, densidad muy alta de raíces, límite uniforme y claro. Se trata de una capa de material alterado, sobrepuesto.

Ahb 10-28 cm Color pardo rojizo oscuro (5 YR 3/6), textura franco-arcillo-arenosa, contenido medio alto de materia orgánica (5.6%), ácido (pH 4.4 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (0-0.5%). Estructura granular, fina, débil, densidad aparente de baja a mediana (1.1 Mg/dm³) pedregosidad del 15%, muchos poros intersticiales, densidad muy alta de raíces, límite uniforme y claro.

Bw 28-71 cm Color pardo rojizo claro a naranja (5 YR 5/8-6/8), textura franco-arcillo-arenosa a arcillo arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.5%), ácido (pH 3.6 en CaCl₂), estructura subangular blocosa, fina, moderada, densidad aparente mediana (1.4 Mg/dm³). Presenta una zona con influencia hidrotermal de color naranja con manchas blancas. Pedregosidad del 7%, muchos poros intersticiales, densidad muy alta de raíces, límite uniforme y difuso.

Cw 71-105/124 cm Color de pardo rojizo claro a naranja opaco (5 YR 5/8 - 7.5 YR 6/4), textura franco-arcillo-arenosa a arcillo-arenosa, contenido bajo de materia orgánica (1.3%), ácido (pH 3.7 en CaCl₂), estructura subangular blocosa, fina, débil, densidad aparente alta (1.6 Mg/dm³), pedregosidad del 30%, densidad media de raíces, límite irregular y claro.

Cw 71-105/124 cm Horizonte similar al anterior, pero de color blanco predominante sobre naranja opaco (5 YR 6/4), ácido (pH 3.2 en CaCl₂), estructura angular blocosa, fina, fuerte.

Cy >124 cm Color naranja amarillento luminoso (10 YR 8/3), contenido muy bajo de materia orgánica (0.4%), ácido (pH 4.2 en CaCl₂), estructura masiva, densidad aparente alta (1.6 Mg/dm³) densidad muy baja de raíces.

1. Información acerca de la localidad.

a. No. de perfil. 6

b. Nombre del sitio: El Bothó, Municipio de Tecozautla, Hgo.

c. Clasificación del suelo:

F.A.O.: Leptosol éutrico.

U.S.D.A.:

d. Fecha de descripción: 24-10-94.

e. Descripción: Manuel Hernández Quiroz.

f. Localización: A 800 m de Tecozautla, por el camino de terracería que va a Yetaii

Coordenadas: U.T.M.: 433019 Long.: 99°39'03" Oeste

2272112 Lat. : 20°33'24" Norte

g. Altitud: 1680 msnm.

h. Forma del terreno:

Posición fisiográfica: Terraza superior plana, microrelieve ninguno.

i. Pendiente sencilla, casi plana 0-0.5 °.

j. Uso de suelo: Agricultura de temporal, tipo de cultivo anual en éste caso milpa de maíz, riego con agua de pozo (El Oinon) cada diez días en época de secas.

k. Clima: *BSIhw''(w)(e)g*: Semiseco templado, el menos seco de su tipo, precipitación media anual de 516.7 mm, la temperatura media anual es de 19.1 °C. (Datos provenientes de la estación meteorológica de Tecozautla (049) a 2 km. aproximadamente, de distancia en dirección SE).

2. Información general acerca del suelo.

a. Material o roca basal: Arenisca - conglomerado.

b. Drenaje natural: Clase 2 (bueno).

c. Condiciones de humedad en el perfil: Fresco.

d. Profundidad al manto freático: No determinada, no afecta al perfil.

e. Presencia de rocas superficiales: No.

f. Evidencia de erosión: No apreciable.

g. Presencia de sales o sodio: No apreciable.

h. Influencia humana: Cultivo.

3. Descripción breve del perfil: perfil somero (27 cm), bien drenado, de color pardo opaco uniforme en apariencia, pedregoso. Desarrollo de estructura moderada con agregados de tamaño medio. Todo el perfil es poroso y permeable, con densidad de raíces alta. Estratificado después de los 27 cm, con material carbonatado (claro) y material no carbonatado (rojizo).

4. Descripción del perfil:

Ap 0-27 cm Color pardo opaco (7.5 YR 5/3), textura franca, contenido bajo de materia orgánica (1.8%), ligeramente alcalino (pH 7.8 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (2-10%). Estructura subangular blocosa, mediana, moderada a débil, densidad aparente mediana (1.2 Mg/dm³) pedregosidad del 3% de gravas finas, muchos poros interestriciales, densidad muy alta de raíces, límite uniforme y claro.

C >27 cm Color gris claro - pardo rojizo oscuro (10 YR 8/2 - 5 YR 3/4), estructura masiva, densidad aparente alta (1.6 Mg/dm³). Estratificado. Con material carbonatado (claro) y material no carbonatado (rojizo).

4. Descripción del perfil:

Ap 0-20 cm Color pardo oscuro (7.5 YR 3/2), textura franca, contenido medio de materia orgánica (3.6 %), ligeramente alcalino (pH 7.8 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (0.5-2%). Estructura subangular blocosa a terrones, de fina a mediana, moderada, densidad aparente mediana (1.2 Mg/dm³) pedregosidad del 2 %, muchos poros intersticiales finos, densidad alta de raíces, límite uniforme y difuso.

Ah 20-56/62 cm Color pardo oscuro (7.5 YR 3/4), textura franca, contenido medio de materia orgánica (3.2%), alcalino (pH 8.2 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (2-10%). Estructura subangular blocosa, fina a mediana, moderada, densidad aparente media (1.4 Mg/dm³). Presenta algunos micelios de CaCO₃. Pedregosidad del 3%, muchos poros intersticiales finos, densidad alta de raíces, límite uniforme y gradual.

AC 56/62-82 cm Color pardo rojizo oscuro (5 YR 3/3), textura franco-arcillo-arenosa, contenido medio de materia orgánica (2.7%), alcalino (pH 8.1 en CaCl₂). Hay presencia de carbonatos (0.5-2%). Estructura subangular blocosa, fina moderada, densidad aparente alta (1.4 Mg/dm³). Presenta abundantes micelios de CaCO₃. Pedregosidad del 3%, muchos poros intersticiales finos, densidad media de raíces, límite uniforme y gradual.

Cw >82 Color pardo rojizo obscuro (5 YR 3/6), masivo, densidad aparente alta (1.6 Mg/dm³). Con presencia de carbonatos (0-0.5%).

1. información acerca de la localidad.

a. No de perfil: **8**

b. Nombre del sitio: La Mesilla, Municipio de Tecozautla, Hgo.

c. Clasificación del suelo:

F.A.O.: Leptosol mólico.

U.S.D.A.:

d. Fecha de descripción: 24-10-94.

e. Descripción: Manuel Hernández Quiroz.

f. Localización: A 2 1/2 Km. de el poblado "La Mesilla" por el camino de terracería que comunica a la carretera que va de Huichapan a Tecozautla.

Coordenadas: U.T.M.: 427512 Long.: 99°42'04" Oeste
2264174 Lat. : 20° 28'53" Norte

g. Altitud: 1900 msnm.

h. Forma del terreno:

Posición fisiográfica: Cima de meseta, microrelieve ninguno.

i. Pendiente: Sencilla, casi plana 0-0.5 °. Exposición SO.

j. Uso de suelo: Agricultura de temporal, tipo de cultivo anual, en este caso milpa de maíz abandonada con gramíneas.

k. Clima: *BSIhw''(w)(e)g*: Semiseco templado, el menos seco de su tipo, precipitación media anual es de 516.7 mm, la temperatura media anual es de 19.1 °C. (Datos provenientes de la estación meteorológica de Tecozautla (049) situada a 9 km. aproximadamente, en dirección NE).

2. Información general acerca del perfil.

- a. Material o roca basal: Tobas volcánicas.
- b. Drenaje natural: Clase 2 (bueno).
- c. Condición de humedad en el perfil: Fresco.
- d. Profundidad al manto freático: No determinada, no influye al perfil.
- e. Presencia de rocas superficiales: Sí.
- f. Evidencia de erosión: No apreciable.
- g. Presencia de sales o sodio: No apreciable
- h. Influencia humana: Cultivo.

3. Descripción breve del perfil: perfil somero (26 cm), bien drenado de color pardo rojizo oscuro uniforme en apariencia, escasa pedregosidad. Desarrollo de estructura moderada con agregados de tamaño mediano. Todo el perfil es poroso y permeable, la distribución de raíces es alta en los primeros 26 cm y nula después de los 26 cm.

4. Descripción del perfil:

$A(p)$ 0-26 cm Color pardo oscuro (5 YR 3/3), textura franca, contenido medio de materia orgánica (2.1%), ligeramente ácido (pH 6.9 en CaCl_2), estructura subangular blocosa, mediana, moderada, densidad aparente mediana (1.3 Mg/dm^3) pedregosidad del 5% muchos poros intersticiales finos, densidad alta de raíces, límite uniforme y claro.

C_{mw} >26 cm Color naranja (5 YR 6/8), masiva, densidad aparente alta (1.8 Mg/dm^3), densidad de raíces nula.

7. Resultados.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada subunidad de suelo, considerando los resultados analíticos (anexo 1) y la descripción de los perfiles.

Unidad 1: Phaeozems (La Mesilla I, Gandhó y San Joaquín):

Los horizontes y las propiedades de diagnóstico que presentan los suelos de las localidades La Mesilla I y Gandhó los definen dentro de la subunidad Phaeozem háplico por presentar un horizonte A mólico (con un porcentaje de saturación de bases mayor al 50% dentro de los primeros 50 cm). La localidad de San Joaquín se define dentro de la subunidad Phaeozem verti-háplico, la variación inherente de esta subunidad, es la presencia de propiedades vérticas (facetas de presión fricción) característico de suelos Vertisoles.

Los perfiles descritos para esta unidad están representados por el perfil 1 (La Mesilla I), el perfil 4 (Gandhó) y el perfil 2 (San Joaquín), mismos que se presentan en el capítulo 6.

- Localidad: La Mesilla I.

Fisiográficamente se localiza sobre una mesa, con una pendiente que no excede los 0.5°. Geológicamente se ubica sobre tobas del Terciario superior (mapa 2, anexo 2) Es de formación *in situ*. Genéticamente es un suelo poco desarrollado. Morfológicamente presenta dos tipos de horizontes principales A y C con poca diferenciación entre los subhorizontes A.

El suelo es homogéneo en color (10 YR 2/2) pardo oscuro, con límites claros y planos en sus primeros dos subhorizontes y gradual e irregular en el tercero. Su profundidad fisiológica es mediana (51 cm). Presenta una clase textural arcillosa en todo el perfil, con contenidos de 439 g/kg en el primer subhorizonte y de 418 - 502 g/kg de arcilla para el resto del perfil (tabla 11). Los valores de densidad real obtenidos fueron de 2.42 Mg/dm³ para el primer subhorizonte a 2.09 Mg/dm³ para el segundo. Los valores de densidad aparente son bajos y varían de 1.04 Mg/dm³ en el subhorizonte superficial (Ap₁) a 1.13 Mg/dm³ en el subhorizonte inferior (Ap₂), siendo mayor el porcentaje de porosidad en el primer subhorizonte (57 %) que en el segundo (46 %) (Tabla 12).

La acumulación de la materia orgánica en el perfil es de 15.9 kg/dm³ y la acumulación de nitrógeno de 0.66 kg/dm³ (tabla 15). En el primer subhorizonte presenta una estructura de migajón que rompe a granular, mediana, moderada, con un desarrollo a subangular blocosa, mediana, moderada para el último subhorizonte. La CIC de la fracción de arcillas del suelo es de 24 cmol/kg de arcilla en el primer subhorizonte y de 43 a 32 cmol/kg en los dos inferiores (Blume, 1990) (tabla 14). La relación de óxidos de Fe_d/Fe_o es de 1.5 en los dos primeros subhorizontes a 1.6 en el último, de Al_d/Al_o es de 3.8 en el primer subhorizonte a 4.1 del último y de Mn_d/Mn_o de 0.9 en el primer subhorizonte de 2 en el segundo subhorizonte y de 0.9 en el tercero (tabla 16). No hay presencia de carbonatos.

La densidad de raíces es alta en el subhorizonte superior a baja en el último subhorizonte. El volumen de porosidad total (VPT) es clasificado de alto en sus subhorizontes Ap₁ y Ap₂ (60-56% respectivamente), con una capacidad de aireación de alta a muy alta de 23-15 Vol. % respectivamente. La capacidad de campo (cc) es muy baja (90 L/m²) en el perfil y el rango de humedad aprovechable (dcc) es bajo (78 L/m²) (Siebe-Grabach et al., 1996) (fig. 3a) (tablas 10a y 10b). Su permeabilidad es moderadamente lenta en los dos primeros subhorizontes a moderada en el último (1.8-1.4 cm/h) (tabla 12).

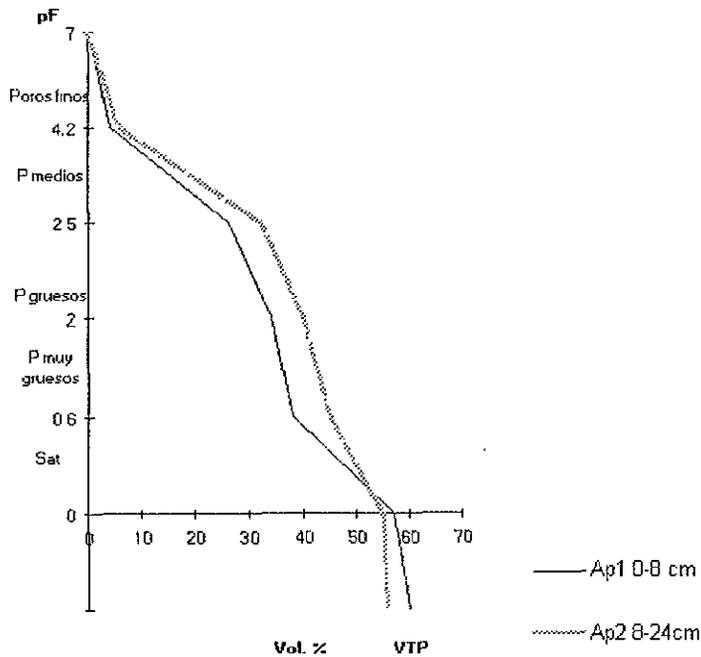


Fig. 3a: La Mesilla I (perfil 1) curvas de retención de humedad.

El valor del pH del extracto de saturación es de 8.16 clasificándose de alcalino (Jones y Wolf, 1984). La conductividad eléctrica es de 0.54 mScm⁻¹, la cantidad de iones solubles es pequeña y variada, siendo el catión soluble dominante el Ca⁺⁺ y el Cl⁻ el anión soluble dominante (tabla 13). El valor de pH va de 6.03 en el primer subhorizonte a 6.35 en el último subhorizonte, clasificándose de ácido a ligeramente ácido (Jones y Wolf, 1984). El porcentaje Na + Mg vs CIC es de 15 % en el primer subhorizonte, de 20 % en el segundo y de 9 % en el último subhorizonte. La relación Ca/Mg intercambiable es alta (6.11) en el primer subhorizonte, favorable (4) en el segundo y alta (11.8) en el tercer subhorizonte (Guerrero-García, 1990). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es mediana en el subhorizonte superior (20 cmol/kg) y medianamente alta en el resto del perfil (25 - 23 cmol/kg) (Cottenie, 1980) (tabla 14).

El contenido de la materia orgánica es de 32 a 23 g/kg clasificándose de rico para el primer subhorizonte a medio en el segundo (Velasco-Molina, 1983). El contenido de nitrógeno total es de 1.2 g/kg en el primer subhorizonte a 0.9 g/kg para el segundo horizonte clasificándose de medianamente pobre (Moreno, 1978), su relación C/N es de alta a mediana (15-14); el contenido de fósforo es muy bajo (1.6 a 0.2 mg/kg) para los tres subhorizontes (CSTPA, 1980).

En comparación con el contenido de metales totales en suelos normales de texturas finas de Fiedler y Roessler (1988) (tabla 1), la concentración de Zn total es considerada baja en sus primeros dos subhorizontes (41-39 mg/kg), con un incremento brusco, pero sin salir de un rango considerado normal (132 mg/kg) en el subhorizonte inferior. La concentración de Cu y Ni es baja con una ligera tendencia a incrementarse con la profundidad, pero con la característica que su concentración es más alta en su subhorizonte Ap₁ que en el Ap₂. El Co observa el mismo comportamiento, pero con una concentración más alta considerada normal en todo el horizonte. El contenido de Pb se encuentra en mayor concentración en el subhorizonte superior (37 mg/kg) clasificándose de bajo y decreciendo con la profundidad; los valores de Cd varían levemente, pero en una concentración considerada como normal de 0.6 mg/kg en el subhorizonte superior a 0.65 mg/kg en el resto del perfil (fig. 3b) (tabla 17).

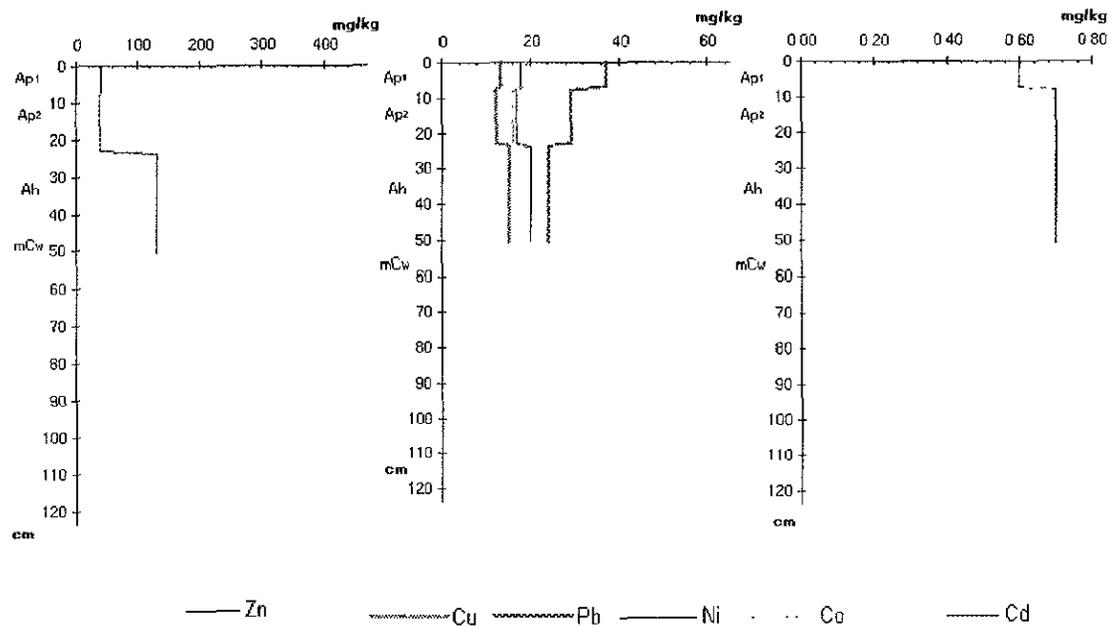


Fig. 3b: Patrones de distribución de metales totales con la profundidad del suelo, en el perfil La Mesilla 1 (perfil 1).

- Localidad: **Gandhó**.

Fisiográficamente se localiza en fondos de valle plano, con una pendiente que no excede los 0.5° . Litológicamente se ubica sobre material aluvial depositado sobre arenisca continental del Terciario superior (mapa 2, anexo 2). Morfológicamente presentan dos tipos de horizontes principales A y C.

En la localidad de Gandhó el perfil es de un color pardo oscuro (10 YR 2/3) en sus primeros dos subhorizontes a pardo rojizo (5 YR 4/6) en el último, en donde además presenta concreciones dendríticas negras verticales de Mn. El límite entre el primero y segundo subhorizonte es plano y difuso, y plano y claro entre el segundo subhorizonte y el tercer horizonte. Su profundidad fisiológica es mediana (48 cm). El perfil en sus primeros dos subhorizontes presenta una textura franco-arcillosa con 378 a 388 g/kg de arcillas disminuyendo a 123 g/kg en el tercer horizonte que es de tipo franco-arenoso (tabla 11). El volumen de piedras es de 3 a 2 % en los primeros dos subhorizontes. El valor de la densidad real es de 2.45 Mg/dm^3 en el subhorizonte superior a 2.10 Mg/dm^3 en el último horizonte. Su densidad aparente es de 1.09 Mg/dm^3 en su subhorizonte Ap con 55 % de porosidad y 1.14 mg/dm^3 en el Ah con 51 % de porosidad (tabla 12).

Presenta una densidad media de raíces en los dos primeros subhorizontes y nula en el tercer horizonte. El volumen de porosidad total es muy alto a alto para sus subhorizontes Ap y Ah (63-60 Vol. %), con una capacidad de aireación muy alta (26-19 Vol. %); la capacidad de campo se evaluó para todo el perfil siendo baja (178 L/m^2) y su rango de humedad aprovechable (167 L/m^2) es clasificado como alto (Siebe-Grabach et al., 1996) (fig. 4a) (tabla 10a y 10b). La permeabilidad presenta índices moderados en los primeros dos subhorizontes (tabla 12).

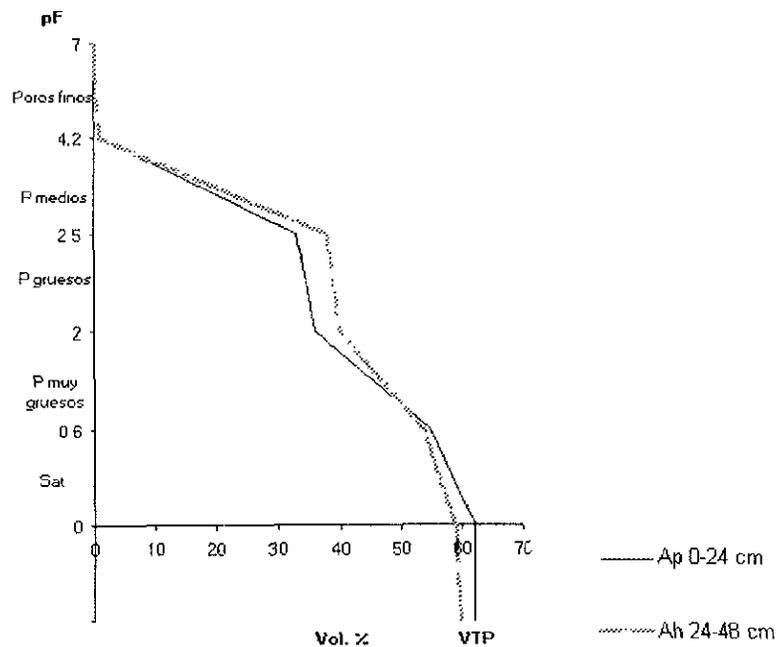


Fig. 4a: Gandhó (perfil 4) Curvas de retención de humedad.

La acumulación de la materia orgánica en el perfil es de 23.9 kg/dm³ y de nitrógeno de 0.95 kg/dm³ (tabla 15). Su estructura va de terrones a subangular en bloques, mediana a gruesa, moderada para el primer subhorizonte, con un desarrollo a masiva en el último. El valor de la CIC de la fracción arcillosa de 45 cmol/kg arcilla en el primer subhorizonte a 85 cmol/kg arcilla del segundo subhorizonte, el valor del último horizonte de 402 cmol/kg arcilla es alto (Blume, 1990) (tabla 14). La relación de óxidos de Fe_d/Fe_o es de 0.2 en el primer subhorizonte a 0.1 para el resto del perfil, la relación de Al_d/Al_o es de 2.5 en el primer subhorizonte a 2.1 para el último horizonte y la de Mn_d/Mn_o de 0.8 en el primer subhorizonte disminuyendo a 0.5 y de 1.1 en el último horizonte (tabla 16).

El valor de pH del extracto de saturación en el primer subhorizonte es de 9.02 clasificándose de fuertemente alcalino (Jones y Wolf, 1984). La conductividad eléctrica es de 2.12 mScm⁻¹ de tipo muy ligeramente salino. El sodio soluble se encuentra en igual concentración que el calcio (7.4 mmol dm⁻³) y el bicarbonato es el principal anión dominante (7.7 mmol dm⁻³) (tabla 13). El valor pH en cloruro de calcio va de 7.34 a 7.23 clasificándose como neutro (Jones y Wolf, 1984). El rango de Ca/Mg es alto para el primer subhorizonte (5.8), bajo en el segundo (1.7) y considerado como óptimo en el tercer horizonte (3.8) (Guerrero-García, 1990). El porcentaje de Na + Mg intercambiables vs CIC es de 23 % para el primer subhorizonte a 39 % en el segundo y de 25 % en el tercer horizonte. El valor de la CIC es alto para todo el perfil (31.3 - 54.5 cmol/kg) (tabla 14).

El contenido de materia orgánica es de 46 g/kg en el primer subhorizonte a 1.5 g/kg en el último horizonte, clasificándose de rico a medianamente pobre, respectivamente (Velasco-Molina, 1983). El contenido de nitrógeno va de 2.1 a 0.1 g/kg clasificándose de medianamente rico a pobre (Moreno, 1978); el valor de la relación C/N es mediano en los primeros dos subhorizontes (12). Como se observa en la tabla 15, se presentan valores altos de fósforo (78 mg/kg) en el primer subhorizonte, los valores en los horizontes inferiores son de 14 a 3.6 mg/kg y se clasifican de medios a muy bajos.

De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988), en comparación con el contenido de metales totales en suelos normales de texturas finas (tabla 1), la concentración de Zn en este suelo es considerada como normal en el primer subhorizonte (120 mg/kg), decreciendo en el resto del perfil (54-91 mg/kg). El intervalo de los contenidos de Cu son bajos y va de 28 mg/kg en su subhorizonte superior decreciendo a 12 mg/kg en el resto del perfil. El Ni tiende a incrementarse ligeramente (12-13 mg/kg) con la profundidad. El Co se encuentra en un rango normal (21 mg/kg) variando poco. El Pb es bajo en todo el perfil, (25 a 28 mg/kg) y el Cd se mantiene igualmente uniforme (0.55 - 0.60 mg/kg) y en una concentración considerada como normal (fig. 4b) (Tabla 17).

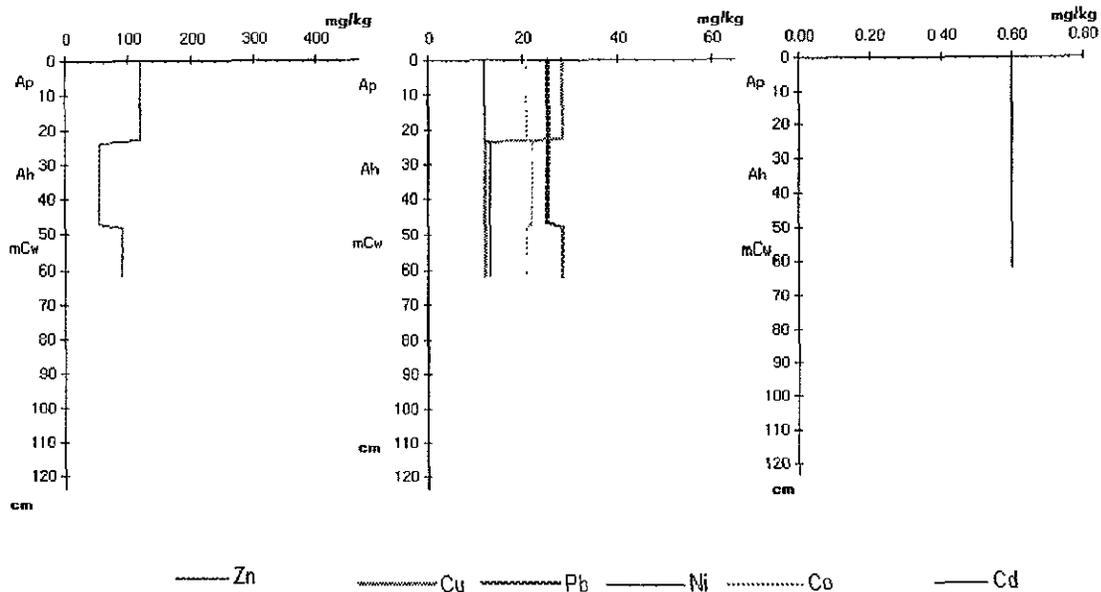


Fig. 4b: Patrones de distribución de metales totales con la profundidad del suelo, en el perfil de Gandhó (perfil 4).

- Localidad: **San Joaquín.**

Se localiza en fondo de valle plano (con una pendiente que no excede los 0.5°). Se ha desarrollado de sedimentos aluviales en épocas recientes (Holoceno) (mapa 2, anexo 2). Morfológicamente presentan un horizonte superficial subdividido en cuatro subhorizontes: dos Ap de 32 cm de profundidad sobre dos Ah.

El perfil es homogéneo en color pardo oscuro (10 YR 2/2), con un límite claro e irregular en el subhorizonte superior y gradual en los subhorizontes inferiores. Su profundidad fisiológica es mediana (>50 cm). El perfil presenta una textura arcillosa con 479 g/kg de arcillas en el subhorizonte superior, descansando en subhorizontes de textura franco arcillosa con 328 a 349 g/kg de arcillas en el segundo y tercer subhorizontes y de 308 g/kg de arcillas en el último (tabla 11). Los valores de densidad real fueron de 2.49 Mg/dm^3 para el subhorizonte superior Ap_2 disminuyendo a 2.11 Mg/dm^3 en el subhorizonte inferior Ah_2 . El valor de la densidad aparente es de 0.96 Mg/dm^3 con 60% de porosidad en el subhorizonte Ap_2 y de 1.17 Mg/dm^3 para el subhorizonte Ah_1 , disminuyendo el porcentaje de porosidad a 46 % (tabla 12).

La acumulación de la materia orgánica en el perfil es de 19.5 kg/dm^3 y de nitrógeno de 1.16 kg/dm^3 (Siebe-Grabach et al, 1996) (tabla 15). El primer subhorizonte está conformado por costras poligonales de 2 cm de espesor y de estructura laminar de gruesa a mediana, moderada y de consistencia bofa. El segundo subhorizonte tiene una estructura granular a subangular blocosa, fina a mediana, débil, con un desarrollo de subangular a

angular blocosa, mediana, moderada para el resto del perfil. El valor de la CIC de la fracción de arcilla es de 64 cmol/kg arcilla en el primer subhorizonte a 110 cmol/kg del último subhorizonte (Blume, 1990) (tabla 14).

La relación de óxidos de Fe_d/Fe_o es de 0.7 en el primer subhorizonte, en el segundo subhorizonte es de 0.9 a 0.2 en el resto del perfil, la relación de Al_d/Al_o es de 4.3 en el primer subhorizonte a 2.7 para el último subhorizonte y de Mn_d/Mn_o es variable en el perfil y va de 0.9 en el primer subhorizonte aumentando a 1.3 en el segundo y de 0.8 a 0.9 del tercer y cuarto subhorizontes (tabla 16). No hay presencia de carbonatos.

Presenta una densidad baja de raíces en el primer subhorizonte a alta en el segundo subhorizonte y mediana en el tercer subhorizonte. El volumen de porosidad total es muy alto en sus dos subhorizontes Ap_2 y Ah_1 (68-78 Vol. %) respectivamente, con una capacidad de aireación de 20 a 15 Vol. %, clasificándose de muy alta a alta; su capacidad de campo es baja ($134 L/m^2$), con un rango de humedad aprovechable ($77 L/m^2$) alto (Siebe-Grabach et al., 1996) (fig. 5a) (tabla 10a y 10b). Su permeabilidad es moderadamente lenta para todo el perfil (1.3-0.8 cm/h) (tabla 12)

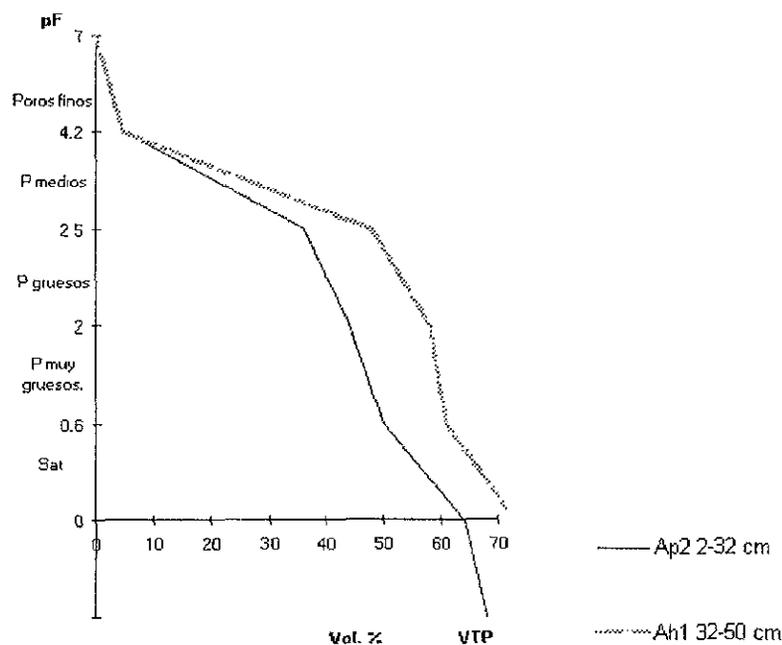


Fig. 5a: San Joaquín (perfil 2) Curvas de retención de humedad.

El valor de pH de su extracto de saturación del primer subhorizonte es clasificado de alcalino (8.23) (Jones y Wolf, 1984). La conductividad eléctrica es de $0.44 mScm^{-1}$, con una cantidad pequeña, pero variable de iones solubles, donde el contenido de Na^+ soluble supera al de Ca^{++} y Mg^{++} juntos, pero la relación de adsorción de sodio no es elevada (2.8 %) (tabla 13). El valor de pH es de 6.63 ($CaCl_2$) en el subhorizonte superior a 7.68 clasificándose de neutro a alcalino (Jones y Wolf, 1984). La relación Ca/Mg es baja de 2.6 para el primer

subhorizonte a muy alta 22.5 en el último subhorizonte. El contenido de Na^+ intercambiable en relación a la capacidad de intercambio catiónico es baja, menor al 15 %. El valor del $\text{Na} + \text{Mg}$ vs CIC es de 28% en el primer subhorizonte a 21% en el segundo y de 23 a 9% en el resto del perfil. El Ca^{++} es el principal catión intercambiable cuya cantidad aumenta con la profundidad. El valor de CIC es alto para todo el perfil excepto en su subhorizonte Ah_1 que se clasifica de muy alto (46 cmol/kg) (Cottenie, 1980).

El contenido de materia orgánica va de 25 g/kg para el subhorizonte superficial a 14 g/kg clasificándose de medianamente rico a medianamente pobre para el resto del perfil (Velasco-Molina, 1983). Hay una alta relación C/N en los primeros tres subhorizontes de 21 a 12 y mediana en el último de 7. De igual forma existen deficiencias en fósforo (1.9-8.4 mg/kg), clasificándose de bajo para los tres primeros subhorizontes a medio en el último subhorizonte (CSTPA, 1980).

De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) en comparación con el contenido de metales totales en suelos normales de texturas finas (tabla 1), la concentración de Zn es normal en el primer subhorizonte (87 mg/kg) y baja en el resto del perfil (43 - 49 mg/kg). El Cu y el Ni se encuentran en una concentración baja sin gran variación. El Co se halla en una concentración normal con 21 mg/kg en su subhorizonte superior a 18 mg/kg en su subhorizonte Ah_1 y un máximo de 28 mg/kg en su subhorizonte Ah_2 . La concentración de Pb es baja en todo el perfil (19 mg/kg) con un máximo de concentración (21 mg/kg) en el subhorizonte Ah_1 . La concentración de Cd es baja (0.5 mg/kg) y se distribuye uniformemente en todo el perfil (fig. 5b) (tabla 17).

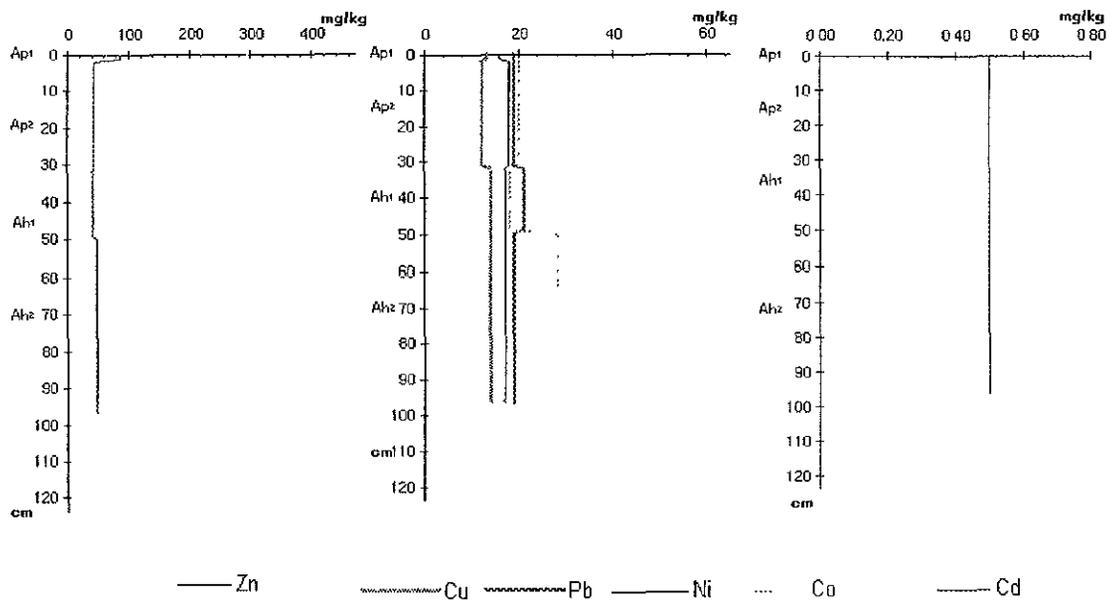


Fig. 5b: Patrones de distribución de metales totales con la profundidad del suelo, en el perfil de San Joaquín (perfil 2).

Unidad Calcisol (Pañhé y Yetay):

Los horizontes y las propiedades de diagnóstico que presentan los suelos de las localidades Pañhé y Yetay los definen dentro de la subunidad Calcisol háplico, son suelos con acumulación de CaCO_3 y/o yeso y presentan un horizonte A ócrico.

- Localidad: Pañhé.

Fisiográficamente se localiza en una terraza alta y plana del valle de Tecozautla (con una pendiente que no excede los 0.5°). Litológicamente se ubica sobre áreas del Terciario superior, desarrollado a partir de rocas calizas y areniscas (mapa 2, anexo 2). Presenta un horizonte A ócrico sobre un horizonte B del tipo cámbico calcárico (Bk) con acumulación de carbonatos y un horizonte transicional BCKw diferenciado del horizonte C por una estructura menos desarrollada.

El perfil es de color pardo (10 YR 4/4) en su horizonte superior, aclarándose en los horizontes inferiores (7.5 YR 4/3-5/3), con un límite claro y quebrado en sus dos primeros horizontes a claro y plano en el último. Su profundidad fisiológica es mediana (50 cm). La clase textural del perfil es franco-arcillosa para el primer horizonte con 366 g/kg de arcilla, arcillosa en los dos horizontes inferiores con una cantidad mayor de arcilla de 456 a 419 g/kg y de franco-arenoso en su último horizonte, disminuyendo a 172 g/kg de arcillas (tabla 11). Presenta una pedregosidad del 3 % por volumen de cantos finos en el horizonte superior y de 1 a 10 % en el resto del perfil. Los valores de densidad real van de 2.10 Mg/dm^3 en el horizonte superior a 2.01 Mg/dm^3 en el último. Los valores de densidad aparente son de 0.74 Mg/dm^3 en su horizonte superior Ap con 65 % de porosidad a 1.09 Mg/dm^3 en el horizonte BCKw disminuyendo el porcentaje de porosidad a 48% (tabla 12).

La acumulación de la materia orgánica en el perfil es de 16.8 kg/dm^3 y de nitrógeno de 0.84 kg/dm^3 (Siebe-Grabach et al., 1996) (tabla 15). Su estructura va de terrones y bloques subangulares, mediana a gruesa en el primer horizonte y masiva en el último horizonte, en donde presenta moteado de color negro de menos de 1 cm de diámetro. El valor de la CIC de la fracción de arcillas 192.1 cmol/kg arcilla en el primer horizonte a 107.7 cmol/kg del último horizonte (Blume, 1990) (tabla 14). La relación de óxidos de Fe_d/Fe_o es de 0.1 en el primer horizonte, en el segundo horizonte es de 0.2 a 0.06 en el último horizonte y la relación de Al_d/Al_o es de 2.2 en el primer horizonte a 2.7 del segundo y tercer horizontes y de 2.1 para el último horizonte y de Mn_d/Mn_o va de 0.5 para el primer horizonte a 0.8 en el tercer horizonte y 0.5 en el último (tabla 16). Hay presencia alta de carbonatos (2-10) en sus primeros tres horizontes (tabla 14).

La densidad de raíces es media para el horizonte superior, baja en el horizonte BCKw y nula en el horizonte C. El volumen de porosidad total es muy alto en sus horizontes Ap y BCKw (62-61 Vol. %) respectivamente, donde su capacidad de aireación va de muy alta a alta (27-16 Vol. %) respectivamente. Su capacidad de campo es muy baja (180 L/m^2) y su rango de humedad aprovechable es alto 178 L/m^2 (tablas 10a y 10b) (fig. 6a) Su permeabilidad es moderadamente lenta en el horizonte superior (1.7 cm/h) con moderados valores de permeabilidad en el resto del perfil (2.9 a 6.1 cm/h) (tabla 12).

El valor de pH en su extracto de saturación es de 8.34 clasificándose de alcalino (Jones y Wolf, 1984). La conductividad eléctrica es de 0.9 mScm^{-1} . El contenido de sodio soluble (3.9 mmol dm^{-3}) iguala al contenido de calcio y magnesio juntos, pero las relaciones de adsorción de sodio no son elevadas (2.8). El valor de pH en CaCl_2 es de 7.59 a 7.64, clasificándose de alcalino (Jones y Wolf, 1984) para todo el perfil. El porcentaje de $\text{Na} + \text{Mg}$ intercambiables es de 14 % en el primer horizonte a 33% en el resto del perfil. La dominancia de Ca^{++} intercambiable es alta en la relación Ca/Mg (>5). El valor de la CIC es muy alto en todo el perfil con 79 cmol/kg del primer horizonte a 69 cmol/kg en el segundo horizonte y de 83 a 72 cmol/kg para el resto del perfil.

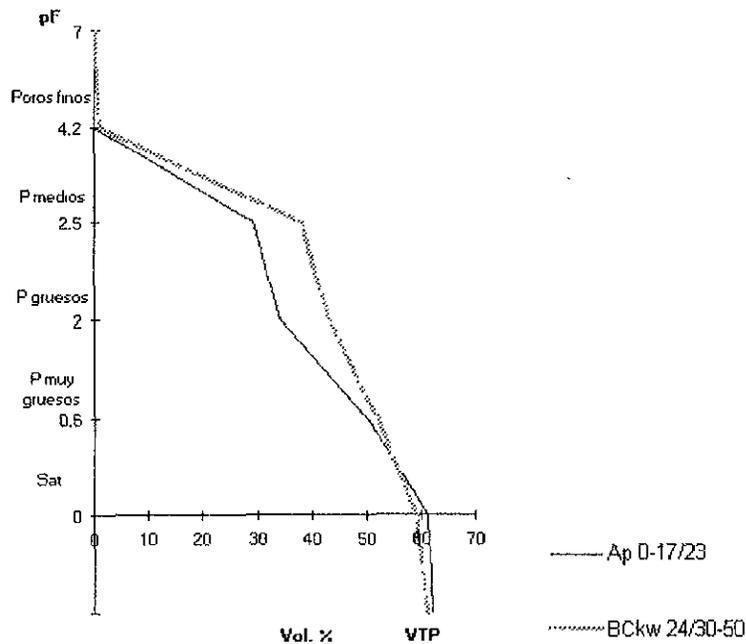


Fig. 6a: Panhé (perfil 3) Curvas de retención de humedad.

El contenido de materia orgánica va de 29 g/kg para el horizonte superior a 13 g/kg en el inferior, clasificándose de medianamente rico a medianamente pobre (Velasco-Molina, 1983). En correspondencia, el contenido de nitrógeno va de 1.4 g/kg para el horizonte superior a 0.5 g/kg en el inferior, y se clasifica de mediano a medianamente pobre (Moreno, 1978). El fósforo varía de 30 mg/kg en el horizonte superficial, clasificándose de alto, y mientras que para el resto del perfil es de 6.4 a 1.5 mg/kg clasificándose como bajo (CSTPA, 1980) (tabla 15).

De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) en comparación con el contenido de metales totales en suelos normales de texturas finas (tabla 1), la concentración de Zn es baja en todo el perfil (60-78 mg/kg), excepto para su horizonte Bk donde se incrementa bruscamente (160 mg/kg), pero manteniéndose dentro del rango normal. La concentración de Cu es baja en todo el perfil, con una mayor acumulación en el horizonte superior (15 mg/kg) y la mínima en su horizonte Bk (12 mg/kg). La concentración de Ni es baja en todo

el perfil con muy poca diferencia de concentración en el horizonte Bk (18 mg/kg). La concentración de Co es normal con ligera tendencia a aumentar en los horizontes Bk y BCkw (23 mg/kg). El Pb se encuentra en concentraciones bajas con un máximo de concentración en su horizonte BCkw (26 mg/kg). La concentración de Cd es baja (0.7 mg/kg) y uniforme en todo el perfil (fig. 6b).

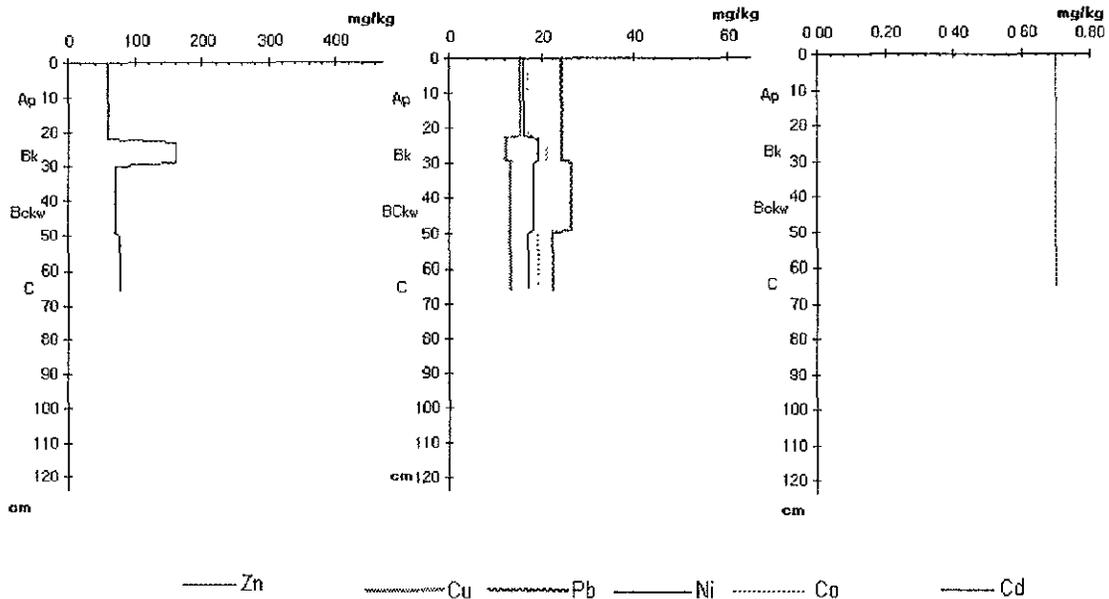


Fig. 6b: Patrones de distribución de metales totales en relación a la profundidad del suelo, en el perfil de Pañlé (perfil 3).

- Localidad: **Yetay**.

Fisiográficamente el suelo se localiza en ladera con una pendiente que no excede los 0.5°. Se ubica sobre áreas del Terciario superior, derivándose a partir de material ígneo extrusivo intermedio (mapa 2, anexo 2). El suelo es poco desarrollado, presenta un horizonte A que se divide en tres subhorizontes: un Ap influenciado por la labranza sobre un subhorizonte Ah y un subhorizonte transicional AC que se diferencia del horizonte C por su estructura menos desarrollada

El perfil de Yetay es de color pardo oscuro (7.5 YR 3/2) en sus dos primeros subhorizontes a café rojizo (5 YR 3/3) en el último, con un límite uniforme y difuso en el subhorizonte superior y uniforme y gradual en los dos inferiores. Su profundidad fisiológica es profunda (82 cm). Presenta una textura franca en el primer subhorizonte con 153 g/kg de arcillas y franco-arcillosa en los subhorizontes inferiores con 322 a 372 g/kg de arcillas (tabla 11). Presenta una pedregosidad de 2 a 3 % por volumen. El valor de su densidad real es de 2.39 a 2.25 Mg/dm³. El valor de la densidad aparente es 1.01 Mg/dm³ en el subhorizonte Ap con 56 % de porosidad y de 1.06 Mg/dm³ en el subhorizonte Ah con 53 % de porosidad (tabla 12).

La acumulación de la materia orgánica en el perfil es baja 33.8 kg/dm^3 y de nitrógeno de 0.96 kg/dm^3 (Siebe-Grabach et al, 1996) (tabla 15). La estructura es subangular blocosa con terrones, de tamaño fino a mediano, y grado moderado de desarrollo en el primer subhorizonte, con un desarrollo a subangular blocosa, fina, moderada en los subhorizontes inferiores. El valor de la CIC de la fracción mineral de 217.0 cmol/kg arcilla en el primer subhorizonte a 23.9 cmol/kg del último subhorizonte (Blume, 1990) (tabla 14). La relación de óxidos de Fe_d/Fe_o es de 0.9 en el primer subhorizonte a 1.1 en el último subhorizonte, la relación de Al_d/Al_o es de 2.1 en el primer subhorizonte y de 2.7 a 2.5 para el resto del perfil y de Mn_d/Mn_o de 0.8 para el primer subhorizonte y de 1 a 0.7 para el resto del perfil (tabla 16). Hay presencia de carbonatos que forman acumulaciones filiformes de CaCO_3 que aumentan su número con la profundidad (tabla 14).

La densidad de raíces es alta en sus dos primeros subhorizontes y mediana en el último (AC). El volumen de porosidad total es alto en sus dos subhorizontes Ap y Ah (60 Vol. \%), con una capacidad de aireación muy alta (25 Vol. \%) en el subhorizonte Ap y de mediana a alta en el subhorizonte Ah (12 Vol. \%). La capacidad de campo es mediana (258 L/m^2), con un rango de humedad aprovechable muy alto (224 L/m^2) (tabla 10a y 10b). La permeabilidad es lenta en el primer subhorizonte y moderada en el resto del perfil ($0.2\text{-}2.7 \text{ cm/h}$) (tabla 12) (fig. 7a).

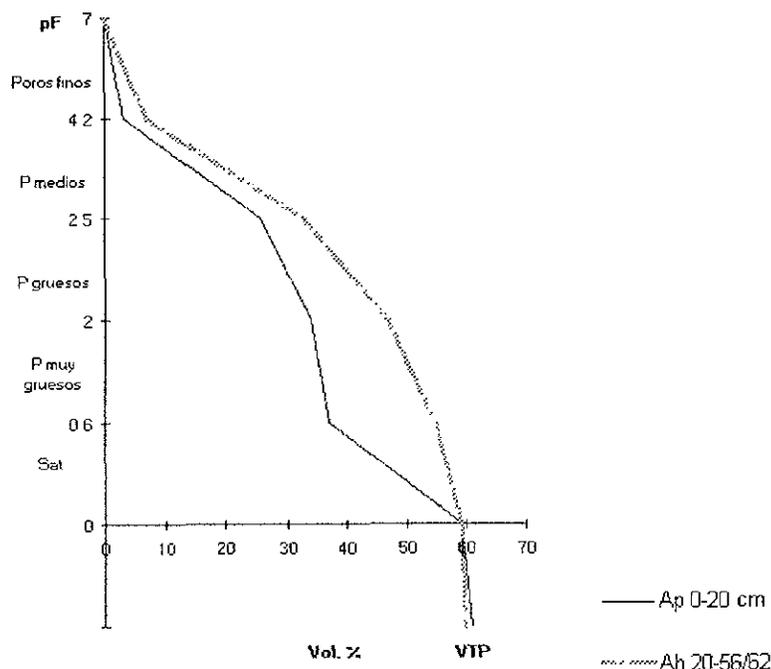


Fig. 7a: Yeta y (perfil 7) Curvas de retención de humedad.

El valor pH de sus extractos de saturación es de 7.78 en el primer subhorizonte a 8.21 del segundo subhorizonte y de 8.10 en el tercer subhorizonte clasificándose de alcalino. La conductividad eléctrica del subhorizonte superficial es de 0.99 mScm^{-1} y aumenta con la profundidad a ligeramente salina 3.75 mScm^{-1} . Los valores de sulfatos solubles se incrementan conforme a la profundidad (1.7 a 40 mmol dm^{-3}) y se observan altos contenidos

de Ca^{++} y Mg^{++} en el complejo de cambio (tabla 13) Su reacción va de 7.78 a 8.10 (CaCl_2) clasificándose de alcalino para todo el perfil (Jones y Wolf, 1984). El porcentaje de sodio intercambiable es menor de 15 %. El valor de $\text{Na} + \text{Mg}$ vs CIC es de 35 % en el subhorizonte superior, de 33 % del segundo subhorizonte y 42 % del tercer subhorizonte. La relación Ca/Mg es baja en todo el perfil de 1.9 para el primer subhorizonte a 2.5 en el último subhorizonte. El valor de su CIC es muy alto en los primeros dos subhorizontes (43.6 a 62 cmol/kg) (tabla 14).

El contenido de materia orgánica va de 36 a 27 g/kg , clasificándose de rico a medianamente rico, con un alto índice de relación C/N de 19 en el primer subhorizonte a 21 en el resto del perfil. Existen deficiencias de fósforo (3.6 a 2.7 mg/kg).

La concentración de Zn se considera baja y va de 45 mg/kg en el subhorizonte superior incrementándose a 62 mg/kg en el inferior. La concentración de Cu es baja tendiendo a incrementarse levemente con la profundidad. La concentración de Ni es baja con una ligera tendencia a incrementarse con la profundidad (20-24 mg/kg). El Co se encuentra en una concentración considerada como normal en sus dos primeros subhorizontes (30-29 mg/kg), saliendo del rango considerado como normal para suelos de textura fina en su último subhorizonte (34 mg/kg). El Pb presenta una concentración máxima en el subhorizonte superior de 20 mg/kg a 17 mg/kg en el inferior clasificándose de baja. La concentración de Cd es normal en sus primeros dos subhorizontes y baja en el último (fig. 7b).

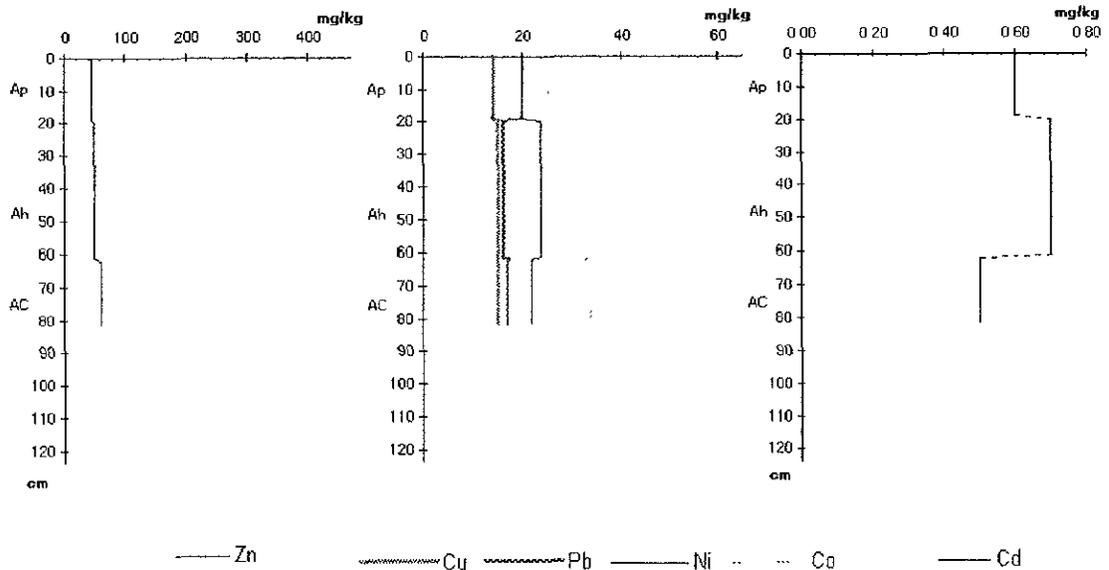


Fig. 7b.- Patrones de distribución de metales totales con la profundidad del suelo, en el perfil de Yetay (perfil 7).

Los perfiles descritos para esta subunidad están representados por el perfil 3 (Pañhé) y el perfil 7 (Yetay), mismos que se presentan en el capítulo 6.

Unidad Cambisol (Rancho Viejo):

Los horizontes y las propiedades de diagnóstico que presenta el suelo de la localidad de Rancho Viejo lo definen dentro de la subunidad Cambisol gypsi-crómico por presentar un horizonte B cámbico de bajo de un horizonte A ócrico, con un porcentaje de bases mayor del 50 % al menos entre los primeros 28 cm y con un matiz de 5 YR y con acumulaciones de yeso mayor al 5%.

- Localidad: **Rancho Viejo.**

Fisiográficamente se localiza en ladera con una pendiente de 15°. Se ubica en áreas del Terciario superior derivándose de material aluvial depositado sobre arenisca continental y calizas (mapa 2, anexo 2). Genéticamente es un suelo de incipiente desarrollo. Morfológicamente es fácil reconocer tres horizontes principales, un horizonte A ócrico que a su vez se subdivide en un subhorizonte A y un subhorizonte Ahb enterrado debido a que ésta junto a un sitio en el que ha sido retirado material, ambos subhorizontes sin influencia de labranza. Sobreyace a un horizonte Bw cámbico de 43 cm de grosor. El horizonte C se divide en un subhorizonte Cw con presencia de rocas del horizonte R (material o roca basal) intemperizadas, mezcladas con yeso pulverulento, suave al tacto, se diferencia del subhorizonte Cy por su color y estructura menos desarrollada.

El color para todo el perfil es pardo rojizo (5 YR 3/3), con zonas blancas de yeso a partir de su horizonte Bw a la profundidad de 71-105/124 cm. Su profundidad fisiológica es profunda (124 cm). La clase textural del perfil en sus primeros tres horizontes es franco-arcillosa con 392 a 397 g/kg de arcilla, sobreyaciendo a horizontes de textura franco-arcillo-arenosa, disminuyendo el contenido de arcillas de 302 a 283 g/kg al aumentar la profundidad (tabla 11). El volumen de piedras es de 30 % en el primer subhorizonte a 7 % del horizonte Bw. En el subhorizonte Cw el volumen de piedras aumenta a 30% en la zona naranja predominante al color blanco. El valor de densidad real es variable siendo de 2.41 Mg/dm³ para el subhorizonte superior y 3.37 Mg/dm³ para el horizonte inferior. El valor de la densidad aparente es de 1.09 Mg/dm³ para el horizonte Bw con 53 % de porosidad (tabla 12).

La acumulación de la materia orgánica en el perfil es de 30.2 kg/dm³ y de nitrógeno de 1.34 kg/dm³ (Siebe-Grabach et al, 1996). La estructura se desarrolla de granular, fina y débil en el horizonte superior a angular blocosa, fina, fuerte en el resto del perfil. El valor de la CIC de la fracción de arcilla de 31.1 cmol/kg arcilla del primer subhorizonte a 146.0 cmol/kg del subhorizonte Cw (naranja); el valor de la CIC de la fracción mineral de los dos últimos subhorizontes Cw (blanco) y Cy con 694.8 cmol/kg arcilla y 552.1 cmol/kg arcilla respectivamente (tabla 14). La relación de óxidos de Fe_d/Fe_o es de 0.2 en el primer subhorizonte a 8.5 en el último horizonte, la relación de Al_d/Al_o es de 3.4 en el primer subhorizonte a 8.8 - 8.1 del subhorizonte Cw y de 14.4 en el último subhorizonte, la relación de Mn_d/Mn_o va de 1.3 en el primer subhorizonte a 0.9 en el horizonte Bw y de 2.2 - 2.6 para el subhorizonte Cw a 2 del último subhorizonte (tabla 16).

La densidad de raíces es muy alta en sus dos primeros subhorizontes a muy baja en el último. El volumen de porosidad total es muy alto en su horizonte Bw (64 Vol. %), con una capacidad de aireación alta (16 Vol. %). La capacidad de campo para el mismo es baja (184 L/m²) y su rango de humedad aprovechable es alto (168 L/m²) (fig. 8a) (tabla 10a y 10b). La permeabilidad es muy rápida a moderadamente rápida (tabla 12).

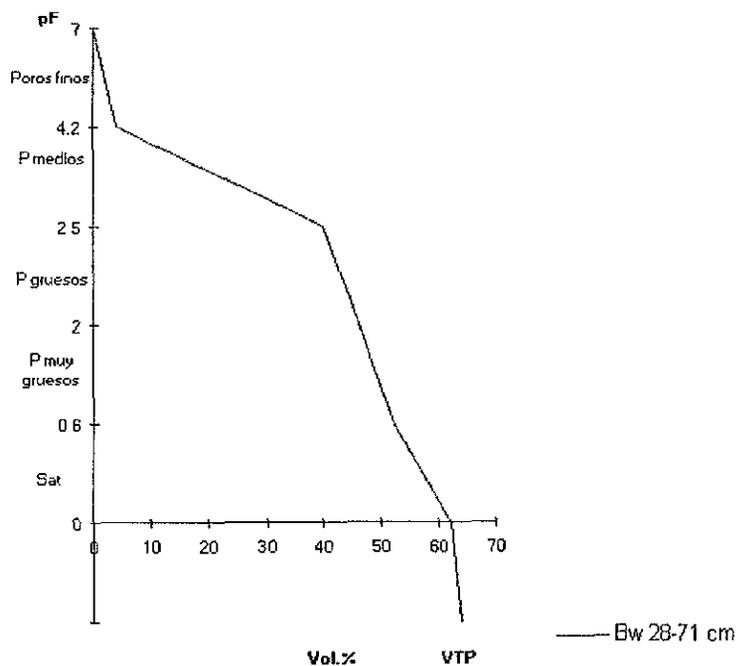


Fig. 8a.- Rancho Viejo (perfil 5) Curvas de retención de humedad.

El valor de pH de sus extractos de saturación va de 7.93 en el subhorizonte superior clasificándose de alcalino y de ácido a muy ácido en el resto del perfil (5.98 a 4.66). La conductividad eléctrica es de 2.8 - 3 mScm⁻¹. Se observa un fuerte desbalance de bases, existen altos contenidos de Ca⁺⁺ soluble y los sulfatos son los principales aniones solubles (tabla 13). El valor de pH es neutro en el primer subhorizonte (6.78) a muy ácido para el resto del perfil (4.43 - 4.6). El porcentaje de Na⁺ intercambiable es menor de 15 %. El valor de Na + Mg vs CIC es de 42 % en el subhorizonte superior a 7 - 17 % del subhorizonte Cw. El Al³⁺ intercambiable predomina sobre el H⁺. La relación Ca/Mg es baja (1.3) para el primer subhorizonte a alta (16.5) del subhorizonte Cy. Su CIC es alta en los primeros tres horizontes (31.9 a 36.4 cmol/kg) y muy alta en los horizontes siguientes (48.3 a 149 cmol/kg) (tabla 14).

La materia orgánica es alta en el primer subhorizonte a extremadamente pobre en el último subhorizonte de 66 a 4g/kg respectivamente (Velasco-Molina, 1983), con una relación C/N variable, es mediana en el primer subhorizonte (13), alta en el segundo (18), baja en el horizonte Bw (9) y medianamente alta (17-12) en el subhorizonte Cw. El fósforo asimilable es bajo (2.6-0.6 mg/kg).

La concentración de Zn es baja en sus dos primeros subhorizontes (85-53 mg/kg), mientras que en el horizonte Bw se sale del intervalo normal para suelos de textura fina (466 mg/kg) (Fiedler y Roessler, 1988). En sus horizontes siguientes se encuentra en un intervalo considerado como normal (206-155 mg/kg). Las concentraciones de Cu y Ni son muy variables (fig. 8b) y se clasifican de bajas; el Co se encuentra en un intervalo normal en sus primeros dos subhorizontes (27-19 mg/kg), saliendo del intervalo normal a partir del horizonte Bw 57 a 32 mg/kg en el subhorizonte inferior. El valor de Pb va de 32 en el subhorizonte superior decreciendo a 16 mg/kg en el inferior; el Cd se distribuye uniformemente en sus dos primeros horizontes (0.7 mg/kg), variando levemente en sus subhorizontes siguientes, pero sin salir del intervalo normal. En el subhorizonte Cw se observa una diferencia en las concentraciones de todos los metales con excepción del Pb, siendo que en la zona de color blanco la concentración es marcadamente más baja que en la zona naranja.

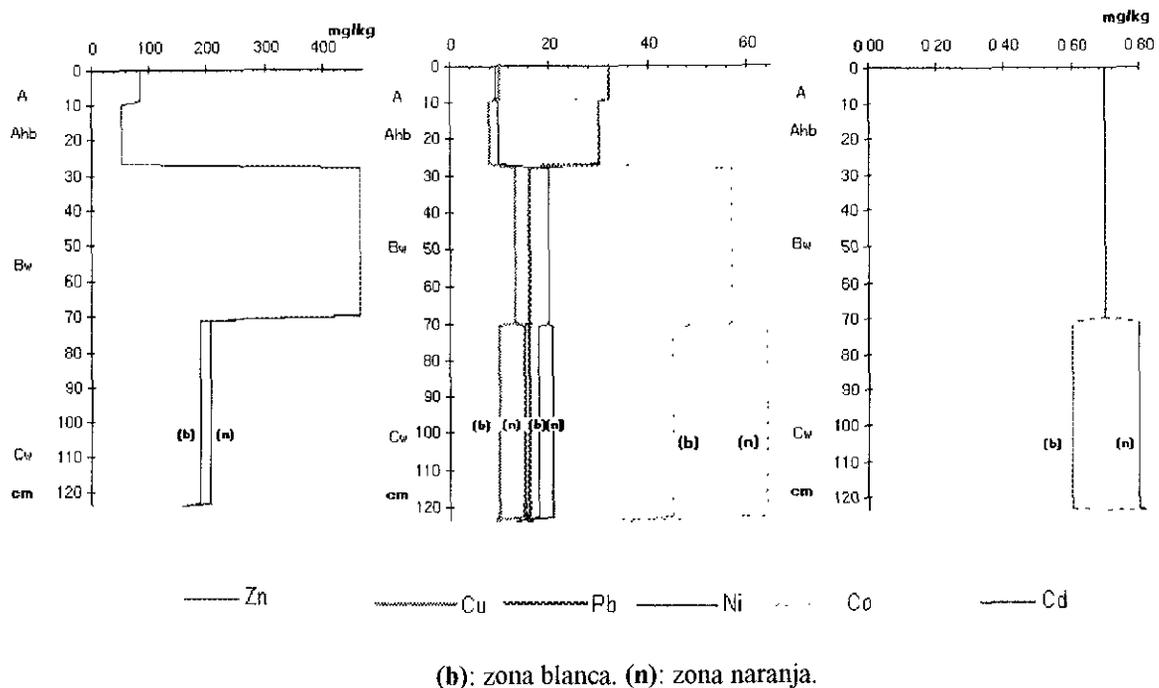


Fig. 8b: Patrones de distribución de metales totales con la profundidad del suelo, en el perfil de Rancho Viejo (perfil 5).

El perfil descrito para esta subunidad está representado por el perfil 5, el cual se presenta en el capítulo 6.

Unidad Leptosol (El Bothó y La Mesilla II):

Los horizontes y las propiedades de diagnóstico que presenta los suelos de la localidad de El Bothó y La Mesilla II los definen dentro de la unidad de Leptosol por ser suelos muy someros limitados por roca dura continua dentro de los primeros 30 cm.

Localidad: **El Bothó.**

Subunidad Leptosol éutrico: se localiza en una terraza superior plana con una pendiente que no excede los 5°. Se desarrolló a partir de arenisca - conglomerados y calizas (mapa 2, anexo 2). Las variaciones inherentes de esta subunidad es la presencia de un horizonte A ócrico sobre un horizonte C con material carbonatado.

El perfil es somero (0-27 cm), de un color pardo opaco (7.5 YR 5/3), con un límite plano y claro, de textura franca con 240 g/kg de arcilla, con una gravosidad del 3 % por volumen de gravas finas. El valor de la densidad real es de 2.3 Mg/dm³; el de densidad aparente es menor a la unidad 0.99 Mg/dm³, con 57 % de porosidad.

Presenta una densidad muy alta de raíces en el horizonte Ap y muy baja en el horizonte Cm. El volumen de porosidad total es muy alto (64 Vol. %), con una capacidad de aireación alta (19 Vol. %); la capacidad de campo es baja (110 L/m²), al igual que su rango de humedad aprovechable (86 L/m²) (tabla 10a y 10b) (fig. 9a). Su permeabilidad es moderadamente rápida (6.4 cm/h) (tabla 12).

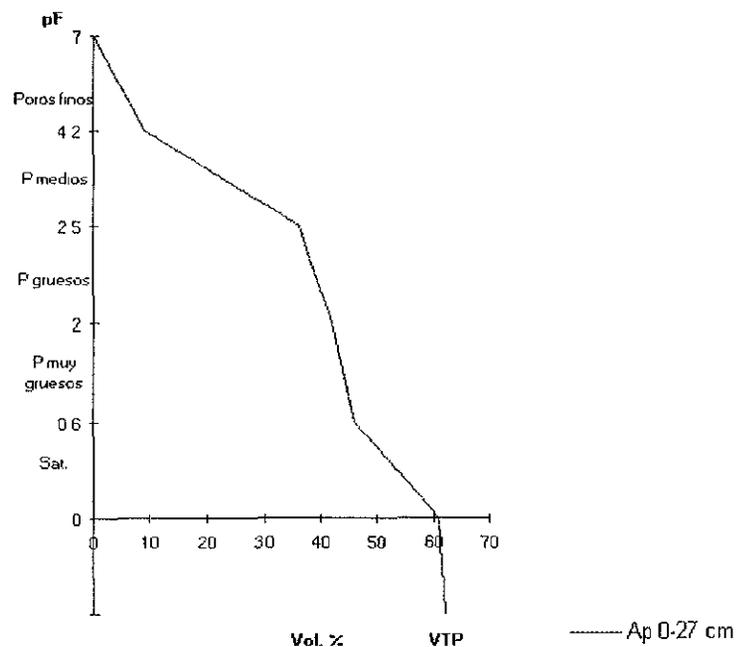


Fig. 9a: El Bothó (perfil 6) Curvas de retención de humedad.

La acumulación de la materia orgánica en el perfil es baja 6.67 kg/dm^3 y de nitrógeno de 0.35 kg/dm^3 (Siebe-Grabach et al., 1996) (tabla 15). Su estructura es subangular. El valor de la CIC de la fracción de arcillas de 281.7 cmol/kg arcilla es alto (Blume, 1990) (tabla 14). La relación de óxidos de Fe_d/Fe_o es de 0.7, la relación de Al_d/Al_o es de 3.1 para todo el perfil y la de Mn_d/Mn_o es de 1.1 (tabla 16).

El valor de pH del extracto de saturación es de 8.36 clasificándose de alcalino. Es ligeramente salino 2.15 mScm^{-1} y su relación de adsorción de sodio es baja (3.5 %), los cloruros son los principales aniones solubles (tabla 13). El valor de pH (CaCl_2) es alcalino 7.83. Existe una dominancia clara de Ca^{++} en el complejo de intercambio con una relación Ca/Mg de 17. El valor $\text{Na} + \text{Mg}$ vs CIC es de 8 %. Su CIC es muy alta de 73 cmol/kg (Cottenie, 1980) (tabla 14).

Hay deficiencia de fósforo (1.8 mg/kg). Los contenidos de materia orgánica son medianamente pobres (18 g/kg) y hay deficiencia de N (1.1 g/kg), la relación C/N es baja (9) (tabla 15) (tabla 17).

Las concentraciones de Zn, Cu, Ni y Pb ($62, 13, 20$ y 22 mg/kg respectivamente) se clasifican como bajas y el Co se encuentra en una concentración normal al igual que el Cd (fig 9b).

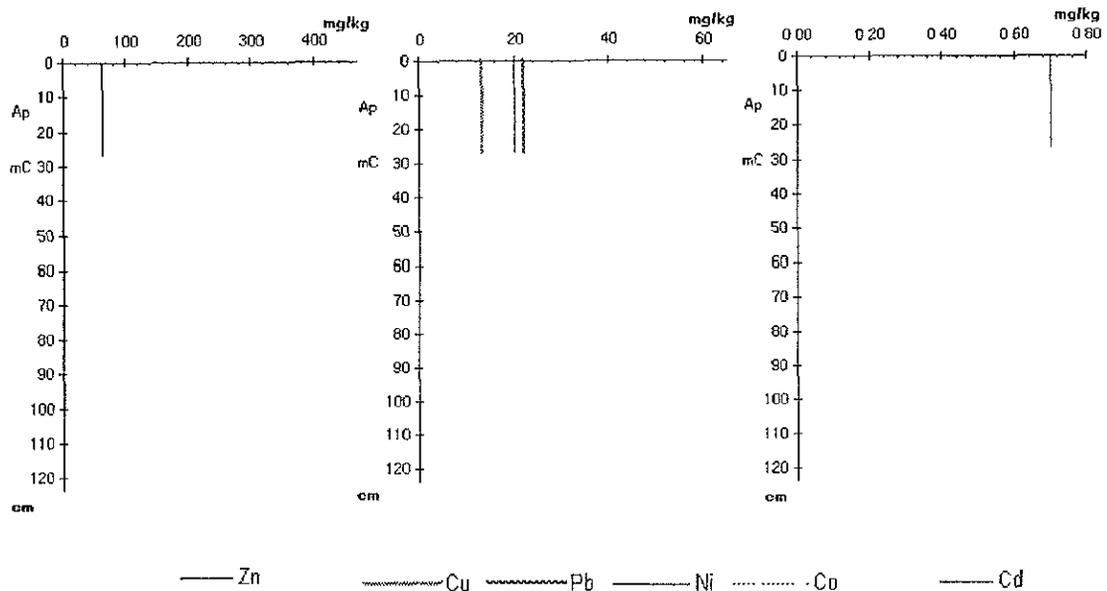


Fig. 9b.- Patrones de distribución de metales totales con la profundidad, en el perfil El Bothó (perfil 6).

El perfil descrito para esta subunidad está representado por el perfil 6, el cual se presenta en el capítulo 6.

Localidad: La Mesilla II

Subunidad Leptosol mólico: se localiza en la superficie de una mesa, con una pendiente que no excede los 0.5° . Se desarrolló *in situ* a partir de tobas del Terciario superior (mapa 2). La variación inherente de esta subunidad es la presencia de un horizonte A mólico sobre un horizonte C (material parental) consistente de tobas altamente intemperizadas.

El perfil es somero (0-26 cm), con un color café rojizo (5 YR 3/3) y límite claro y uniforme. Es de textura franca con 260 g/kg de arcilla (tabla 11), presenta 5 % por volumen de gravas finas. Su valor de densidad real es de 2.3 Mg/dm^3 ; el valor de densidad aparente es de 1.14 Mg/dm^3 con un porcentaje de porosidad de 50 % (tabla 12).

La densidad de raíces está limitada por la estructura masiva del horizonte C_{wm}. El volumen de porosidad total es considerado alto (52 Vol. %), con una capacidad de aireación (12 Vol. %) de alta a mediana; su capacidad de campo es muy baja (89 L/m^2) con un rango de humedad aprovechable bajo (69 L/m^2) (Siebe-Grabach et al., 1996) (fig. 10a) (tabla 10a y 10b). Su permeabilidad es moderada (2.2 cm/h) (tabla 12).

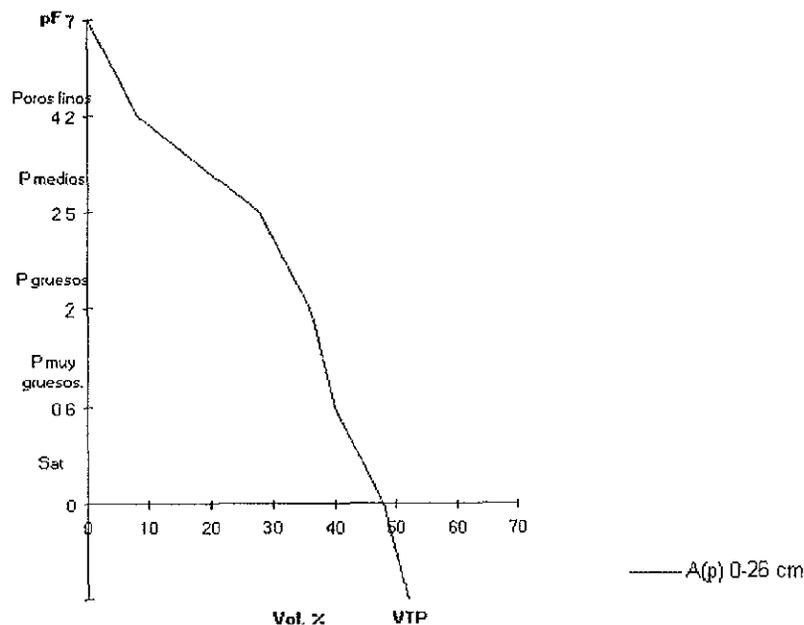


Fig. 10a: La Mesilla II (perfil 8) curvas de retención de humedad.

La acumulación de la materia orgánica en el perfil es 6.9 kg/dm^3 y la acumulación de nitrógeno de 0.30 kg/dm^3 (tabla 15). Su estructura es subangular blocosa, mediana, moderada. El valor de la CIC de la fracción de arcillas del suelo es de 37.3 cmol/kg arcilla

(Blume, 1990) (tabla 14). La relación de óxidos de Fe_d/Fe_o es de 2.4, de Al_d/Al_o de 3.2 para todo el perfil y de Mn_d/Mn_o de 1.1 (tabla 16). No hay presencia de carbonatos

El valor del pH de su extracto de saturación es de 8.33 clasificándose de alcalino. La conductividad eléctrica es de 0.64 mScm^{-1} donde la cantidad de iones es baja, siendo el Ca^{++} y el Cl los iones solubles dominantes. El valor de pH ($CaCl_2$) es muy ligeramente ácido (6.93) La relación Ca/Mg intercambiable no es óptima (>5), (Guerrero-García, 1990). El valor $Na + Mg$ vs CIC es de 7%. Su valor de CIC es medio de 16 cmol/kg (Cottenie, 1980) (tabla 14).

Los contenidos de la materia orgánica y de nitrógeno se clasifican de medianamente pobre de 21 y 1 g/kg respectivamente y su relación C/N es mediana (13); el fósforo (1.8 mg/kg) se clasifica de muy bajo.

De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) en comparación con el contenido de metales totales en suelos normales de texturas finas (tabla 1), las concentraciones de Zn, Cu y Ni total de 40, 11 y 16 mg/kg , respectivamente, son consideradas bajas en todo el perfil; el Co se encuentra en una concentración normal (23 mg/kg); el Pb y el Cd se hallan en niveles bajos 29 y 0.5 mg/kg respectivamente (fig. 10b).

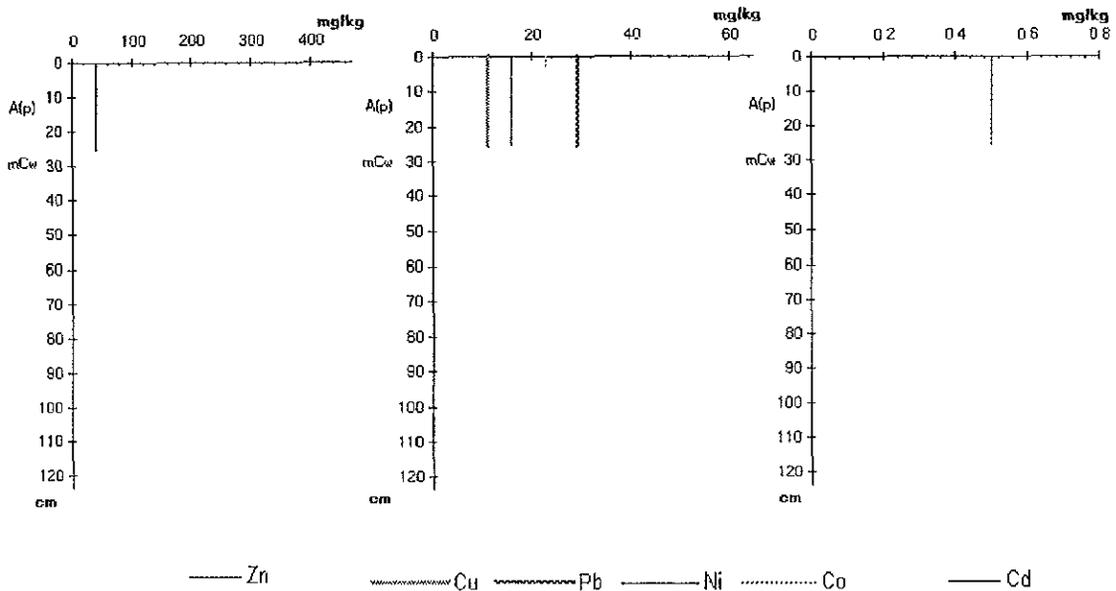


Fig. 10b.- Patrones de distribución de metales totales con la profundidad del suelo, en el perfil La Mesilla II (perfil 8).

El perfil descrito para la Subunidad Leptosol mólico (La mesilla II) está representado por el perfil 8, se presentan en el capítulo 6.

8. Discusión.

8.1. Procesos pedogenéticos dominantes.

La formación de un suelo comprende un conjunto de procesos que transforman una roca o depósito en suelo. En los suelos estudiados se identificaron los siguientes procesos pedogenéticos.

En climas áridos a semiáridos o con épocas de secas pronunciadas, la acumulación de materia orgánica es mayor debido a la baja mineralización por la escasa disponibilidad de agua para los organismos mineralizadores. La acumulación de la materia orgánica en las unidades de suelo varió de 6.9 a 33.8 kg/dm³ (tabla 15). Su menor acumulación se presentó en el suelo de la unidad de Leptosol con 6.7 y 6.9 kg/dm³ respectivamente, que es característico de suelos de la zona, pero conforme los perfiles van adquiriendo mayor profundidad, mayor cantidad de materia orgánica se va incorporando al suelo, como en el caso de las subunidades de suelo de Cambisol gypsi-crómico (Rancho Viejo) y Calcisol háplico (Yetay) con 30.2 y 33.8 kg/dm³ respectivamente. La acumulación de materia orgánica es mayor en condiciones ácidas que en neutras (Siebe-Grabach et al., 1996). Sin embargo, la acumulación es mayor en la localidad de Yetay, que es un suelo de condición alcalina en comparación a la localidad de Rancho Viejo que es de reacción ácida. Esto puede ser debido a que en la localidad de Yetay la materia orgánica forma complejos estables con las arcillas y el CaCO₃, por lo que la materia orgánica no se mineraliza, aumentando su acumulación en el suelo.

La distribución y orden de las partículas primarias en agregados naturales, es producto de la interacción de procesos físicos de expansión y contracción de la fracción de arcillas, de la materia orgánica y exudados de organismos entre otras cosas. En suelos someros (Leptosoles) la agregación natural forma bloques subangulares finos a medianos, de grado moderado. En los suelos medianamente profundos (Phaeozems y Calcisols) se observa que en su superficie, los agregados naturales van siendo disturbados en terrones por la mayor labranza

En la Subunidad Phaeozem verti-háplico se observa la formación de una costra superficial que puede deberse a que las concentraciones de calcio y magnesio solubles se ven superadas por el sodio (tabla 13), mismo que dispersa a las partículas de arcilla, pero en épocas secas se contraen formando costras masivas, que pueden impedir la emergencia de plántulas y su desarrollo. En sus dos horizontes inferiores presenta propiedades vérticas (facetas de presión-fricción) típico de suelos con periodos repetitivos de humedecimiento y secado y dominancia de arcillas esmectitas. Los agregados en forma de migajón observados en la superficie de la localidad La Mesilla I son debido a la alta estabilidad con la materia orgánica.

Los procesos de calcificación y gypsificación son muy comunes en medios ecológicos áridos y semiáridos con un fuerte potencial de evapotranspiración (Duchaufour, 1984 y Porta et al, 1994). Los carbonatos de calcio se encuentran en la mayoría de las unidades de suelo, exceptuando las subunidades de Phaeozems. La precipitación de carbonatos de calcio se produce en profundidad, formándose un horizonte cálcico, que en la localidad de Pañhé y Yetay sirve de horizonte diagnóstico para la caracterización de la unidad de suelo en Calcisol. El acumulo de carbonatos da lugar secundariamente a acumulaciones filiformes por reprecipitación, por la transpiración del sistema radicular de las plantas, que aumentan su número con la profundidad como se observan en la localidad de Yetay.

La gypsificación es un proceso de menor frecuencia, dado que los iones sulfato no existen en grandes proporciones y sólo se les encuentra en ciertas formaciones geológicas muy comunes en el norte de México (Dregne, 1976). La pérdida de calcio se produce en forma de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), pudiendo formarse entonces un horizonte gypico a cierta profundidad como se observa en la localidad de Rancho Viejo Cambisol gypsi-crómico, sirviendo de horizonte diagnóstico para la caracterización de la unidad de suelo en gipsífero con contenidos de yeso mayor del 5 % a partir de su subhorizonte Cmw. Cuando ambos procesos tienen lugar en un mismo perfil, los horizontes de acumulación de yeso ocupan una posición inferior por su mayor solubilidad a los horizontes carbonatados, como se puede observar en la localidad de Rancho Viejo y es evidenciado en el perfil de Yetay por la mayor concentración de sulfatos solubles en su último horizonte (40 mmol dm^{-3}) (Duchaufour, 1984).

Los procesos de oxidación y reducción son menos comunes. Son debido a que en periodos húmedos, después de eventos de precipitación intensos durante la época de lluvias, el Mn y el Fe son reducidos y solubilizados pudiendo entonces emigrar. La relativa impermeabilidad del horizonte C favorece condiciones anaerobias después de lluvias intensas por el estancamiento de agua, propiciando la concentración del manganeso que precipita en los poros en periodos secos (Duchaufour, 1978). Se observaron, en forma de filamentos negros verticales de Mn presentes en Gandhó en su subhorizonte Cmw a 48->62 cm de profundidad y en las manchas negras de Mn presentes en el horizonte C a 50->66 cm de profundidad en Pañhé.

En medios ecológicos áridos a semiáridos, la fracción de arcillas es un componente relativamente estable cuya alteración se encuentra en relación con el medio y sobre todo con el clima (Duchaufour, 1984). El proceso de neoformación de arcillas es muy incipiente en la mayoría de las localidades, exceptuando la subunidad Cambisol gypsi-crómico (Rancho Viejo) donde el proceso está probablemente acelerado por eventos de humedad y temperatura (condición hidrotermal). En las localidades de Pañhé, Gandhó, Rancho Viejo, San Joaquín y Yetay las arcillas son principalmente del tipo heredadas (aluvión). En las localidades de la Mesilla I y II posiblemente son de formación *in situ*, por ser zonas estables ubicadas en partes altas en Tecozautla, donde no reciben aportes de material.

De acuerdo con la CIC (cmol/kg de arcilla), las localidades de La Mesilla I y II presentan la mezcla probable de dos tipos de arcillas caolinitas e ilitas, así como en la localidad de Rancho Viejo en sus primeros dos horizontes, con la mezcla gradual en profundidad de esmectitas, sus dos últimos horizontes se encuentran sobrestimados probablemente por la presencia de yeso. En San Joaquín dominan probablemente las arcillas del tipo de las esmectitas que proporcionan una buena capacidad de retención de nutrientes. En Yetay y El Bothó se infiere la presencia de ilitas y esmectitas (Blume, 1990). Probablemente la presencia de carbonatos de calcio contribuyen a una sobrestimación de la CIC de arcillas ya que ésta se determinó a través de la suma de cationes intercambiables y no se realizó un lavado de sales previo al análisis (tabla 14).

Los óxidos de hierro, aluminio y manganeso se encuentran presentes en todos los suelos. Su importancia genética radica en que los óxidos amorfos evolucionan con el tiempo a formas más ordenadas o cristalinas. El coeficiente de relación entre óxidos cristalinos (extraídos por ditionito de sodio) y los óxidos amorfos (extraídos a base de oxalato) indica el envejecimiento del suelo en el tiempo, variando en relación con el medio (Schlichting y Blume, 1966).

Los coeficientes de Fe_d/Fe_o , Al_d/Al_o y de Mn_d/Mn_o variaron de 0.06 a 8.6, de 2.1 a 14.4 y de 0.5 a 2.6 respectivamente. Esto indica, que la neoformación de óxidos ha tenido tiempo para evolucionar a formas cristalinas. Los valores más bajos se localizaron en las localidades de Pañhé, Gandhó y San Joaquín, denotando una dominancia de óxidos amorfos sobre los cristalinos; genéticamente son suelos jóvenes en comparación a las localidades de su misma unidad. Por ejemplo, como se observa en la tabla 16, el suelo de la subunidad Phaeozem háplico de la localidad La Mesilla I es viejo en comparación con la localidad de Gandhó. De acuerdo con Porta et al (1994) se puede saber que el suelo de la localidad La Mesilla I es más antiguo, ya que su posición es más alta en el paisaje con respecto a la localidad de Gandhó. La subunidad de suelo que se muestra más alterada en relación a las demás, es el Cambisol gypsi-crómico donde su condición hidrotermal puede estar acelerando la neoformación de óxidos de hierro, aluminio y manganeso.

8.2. Características edafocológicas.

La profundidad fisiológica de los suelos es somera (Leptosoles), mediana (Phaeozems y Calcisoles) y profunda (Cambisol). En estos últimos la densidad de raíces está limitada solamente por la estructura masiva del horizonte C. En la subunidad Phaeozem verti-háplico en el horizonte Ah₂ la densidad de raíces puede estar limitada por la contracción y expansión de arcillas, misma que rompe las raíces. Éste problema es de menor gravedad en comparación con un Vertisol. En la subunidad Cambisol gypsi-crómico la pedregosidad no es una limitante para el desarrollo de raíces, pero sí puede estar limitada por la acción del yeso que tiende a cementar y tapar los poros.

En general los suelos poseen buena aptitud para ser cultivados y labrados ya que su espacio poroso total es mayor de 50 Vol. %. El valor de la capacidad de aireación varía de 12 a 27 Vol. %, por lo que en promedio los suelos presentan capacidades de aireación medias a altas y una alta conductividad hidráulica (Siebe-Grabach et al., 1996). Como se observa en la parte inferior de las curvas de retención de humedad (fig. 3a, 4a, 5a, 6a, 7a, 8a, 9a y 10a) durante las primeras dos fases de drenaje tienden a la horizontalidad, dado que es suficiente una leve succión (pF 0, pF 0.6) para separar una gran cantidad de agua (Duchaufour, 1978; Porta et al., 1994). Los horizontes superiores tienen una mayor cantidad de poros gruesos por lo que retienen una menor cantidad de agua, esto es debido a su menor grado de consolidación.

Entre las características más importantes del suelo que tienen influencia en la capacidad de agua disponible son: la materia orgánica, textura, estructura, el contenido de sales que es de gran importancia en zonas áridas y el espesor del suelo (Buckman y Brady, 1991). Como se observa (fig. 3a, 4a, 5a, 6a, 7a, 8a, 9a y 10a), en las siguientes extracciones (pF 2, pF 2.5 y pF 3.5) que corresponden a la región de humedad aprovechable, las curvas tienden a la verticalidad, dado que en esta zona predominan las fuerzas de adhesión y cohesión del agua capilar retenida en la superficie específica de las partículas de cada horizonte. La capacidad de agua disponible varió de 69 a 224 L/m², con un valor promedio de 131 L/m², que según Siebe-Grabach et al. (1996) es de una capacidad mediana. El valor más bajo se encuentra en las subunidades de Phaeozems (69-78 L/m²), el valor más alto se observa en la localidad de la subunidad de Calcisol háplico de Yetay, puede ser debido al alto contenido de materia orgánica (33.8 kg/dm³). Pero como el suelo contiene sales, la planta requiere de mayor energía para absorber el agua, al tener que separar el agua de los iones hidratados.

Un factor limitante para el desarrollo de la vegetación en estos suelos es su baja capacidad de retención de agua, que merma su capacidad de almacenamiento en períodos de secas y refleja una mayor vulnerabilidad a heladas tempranas, relegando su uso potencial para fines agrícolas a la épocas de lluvia o bien recurriendo al riego.

El promedio de la profundidad del manto freático es de 150 m, por lo que los suelos no se ven influenciados significativamente por él. Como se observa en la tabla 12 la conductividad hidráulica es alta debido a que el drenaje natural de los suelos depende de su textura, estructura, capacidad de almacenamiento de agua, evapotranspiración y su posición en el relieve, la cual además se ve condicionada por su distancia al manto freático. Lo que indica suelos con una gran proporción de poros grandes. El drenaje natural es considerado bueno (Siebe-Grabach et al., 1996).

La importancia que se le reconoce a la materia orgánica es su intervención en procesos para el comportamiento del suelo, como es la formación y la estabilización de agregados entre otras características (Buckman y Brady, 1991). La materia orgánica varía de 4 a 66 g/kg ambos extremos se presentan en la localidad de Rancho Viejo. El porcentaje de materia orgánica clasificado de rico en su horizonte superficial, puede deberse a que ésta no

se mineraliza por la presencia de yeso y los pH ácidos. El valor promedio (24.2 g/kg) es superior a lo reportado por Flores-Rodríguez (1993) en el municipio de Pachuca de 16.2 g/kg. Esto puede ser debido a que en Tecozautla la materia orgánica forma complejos órgano-minerales con las arcillas, lo que brinda alta estabilidad a la materia orgánica y por lo tanto ésta no mineraliza (Velasco, 1995), en comparación con el municipio de Pachuca donde los suelos tienen periodos de riego en época de seca con aguas negras

El nitrógeno es probablemente el nutriente más deficiente para las plantas en condiciones áridas a semiáridas (Dregne, 1976). La acumulación de nitrógeno en las unidades de suelo varió de 0.30 kg/dm³ a 1.34 kg/dm³ (tabla 15). Los valores de nitrógeno total oscilaron de acuerdo con Moreno (1978) de pobre 0.1 a rico 3 g/kg. El valor más bajo se localiza en el último horizonte de Gandhó y el valor más alto en el primer horizonte de Rancho Viejo. La relación C/N refleja la mineralización potencial de la materia orgánica. Entre más baja es la relación más rápida es la descomposición del material y entre más alta, la materia orgánica empieza a ser más resistente a la descomposición y aparecen las deficiencias de nitrógeno (Dregne, 1976, Cuanalo, 1995).

Los valores de la relación C/N oscilaron de acuerdo con Moreno (1978) de baja 7 en el subhorizonte Ah₂ de San Joaquín a muy alta 90. El valor máximo de la relación C/N (90) es debido, a que el porcentaje de materia orgánica y nitrógeno son muy bajos en los últimos horizontes del perfil de Gandhó aumentando el grado de error en el análisis. El valor de 21 observado en las localidades de San Joaquín y Yetay infiere que existe un pobre aporte de la mineralización de la materia orgánica y suministro lento de nitrógeno a la planta.

El contenido de fósforo en las muestras varió de acuerdo con CSTPA (1980) de muy bajo 0.2 en el horizonte Ah de la localidad La Mesilla I a muy altos en los horizontes superficiales de las localidades de Gandhó (78 mg/kg) y Panhé (30 mg/kg), lo que indica que probablemente se han aplicado fertilizantes. Sin embargo, una alta fertilización de fósforo puede decrementar el contenido de zinc soluble (Fiedler y Roessler, 1988). En las localidades de San Joaquín, Panhé, Gandhó, El Botho y Yetay se presentan problemas de alcalinidad que producen la precipitación de fósforo formando compuestos insolubles sobre todo con el calcio intercambiable y en algunos casos con los carbonatos de calcio, repercutiendo probablemente en su disponibilidad. En tanto en la localidad de Rancho Viejo los iones fosfato pueden verse afectados por cationes como el Al³⁺ que es común en suelos minerales fuertemente ácidos, formando compuestos insolubles y no aprovechables para las plantas (Rendingk, 1989).

La reacción del suelo fluctúa de 3.19 a 7.83 en CaCl₂, de acuerdo con Jones y Wolf (1984) los suelos se clasifican de muy ácidos (Subunidad de suelo Cambisol gypsi-crómico) a alcalinos principalmente en las subunidades Calcisol háplico (Pañhé y Yetay) y el Leptosol éutrico (El Bothó). El valor alto de pH está asociado con el incremento de calcio, magnesio y carbonatos en la solución del suelo. El valor más bajo evidencia la presencia de Al³⁺ intercambiable que es común en suelos minerales fuertemente ácidos (Duchaufour, 1978). De acuerdo con PPI (1988) el porcentaje de Al³⁺ intercambiable considerado como óptimo para las plantas es de 2 - 4 %. El porcentaje de Al³⁺ intercambiable observado en Rancho

Viejo es muy bajo (0.01 a 0.08 %). Este valor puede estar afectado por el valor de la CIC que es especialmente alta en el suelo. De acuerdo con Rendingsk (1989) la relación Ca/Al es mayor a uno lo que infiere que el Al^{3+} intercambiable no se encuentra en cantidades en que pudiera ser tóxico para las plantas.

Los valores de conductividad eléctrica (C.E.) en los extractos de saturación variaron de 0.44 a 3.75 $mScm^{-1}$. Según Richards (1982) las localidades que se consideran sin problemas de salinidad son La Mesilla I y II, San Joaquín y Pañhé (<2 $mScm^{-1}$) y de tipo ligeramente salino las localidades de Gandhó, Rancho Viejo, El Bothó y Yetay, pero sin llegar a el límite de restricción de cosechas muy sensibles (4 $mScm^{-1}$). Los suelos que resultaron con una conductividad eléctrica ligeramente salina se localizan al Noroeste de la cabecera municipal de Tecozautla (mapa 1).

Del análisis de aguas de riego de pozos del valle de Tecozautla (tabla 6), se observa que en particular, el agua de los pozos localizados al Norte y Noroeste de la cabecera municipal es satisfactoria para el riego (Richards, 1982), pero su conductividad eléctrica se encuentra en un rango de 250 a 750 μScm^{-1} , lo que puede afectar a los suelos originando la incipiente acumulación de sales por el riego con este tipo de agua salobre. Se debe tener especial cuidado con el uso continuo de este tipo de agua, ya que puede afectar los cultivos más sensibles por el aumento en la presión osmótica y por el efecto tóxico de los cloruros, que se encuentran en concentraciones consideradas como altas (>10 $mmol\ dm^{-3}$) (Jones y Wolf, 1984). Los porcentajes de adsorción de sodio intercambiable son menores del 15 % por lo que estos suelos no presentan problemas de sodicidad y el valor de Na + Mg no sobrepasa el 50 % por lo que no hay horizontes con propiedades sódicas (tabla 14).

Las concentraciones encontradas para el calcio, magnesio, sodio y potasio intercambiables variaron de 14.7 a 144.2 $cmol/kg$, de 0.75 a 37.7 $cmol/kg$, de 0.22 a 3.2 $cmol/kg$ y de 0.6 a 3.4 $cmol/kg$, con valores promedio de 47.6, 10, 1.4 y 1.2 $cmol/kg$ (tabla 14). La dominancia alta de calcio intercambiable corrobora suelos enriquecidos de calcio en forma de carbonatos o yeso, dominando en el complejo de cambio, por lo que se debe poner atención en cuestiones de desequilibrio de micronutrientes sobre todo en las localidades de La Mesilla I y II, Panhé, Gandhó, Rancho Viejo y el Bothó donde la disponibilidad de magnesio se inhibe al aumentar el calcio (>5). En San Joaquín en su primer horizonte la relación Ca/Mg (2.6) indica una posible inhibición de fósforo y deficiencia de calcio, pero en los dos horizontes siguientes hay un rango óptimo para la mayoría de los cultivos. En Yetay la relación Ca/Mg es baja lo que indica una posiblemente inhibición de fósforo y deficiencia de calcio a la planta por antagonismo del magnesio (Guerrero-García, 1990) (tabla 14).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) varió de 16 $cmol/kg$ en la localidad La Mesilla II a 179 $cmol/kg$ en la localidad de Rancho Viejo (tabla 14). Este último valor de acuerdo con Cottenie (1980) es muy alto. Generalmente en suelos neutros la CIC es similar a la suma de los cationes básicos, pero en este tipo de suelos carbonatados y gypsicos los valores de calcio y magnesio son altos, estos valores coinciden con lo reportado para suelos gypsicos (Mejía, 1988), siendo lo más probable que con el método utilizado se determine no

sólo el calcio intercambiable, sino también calcio soluble afectando la determinación de la CIC.

La concentración de cationes solubles en orden de abundancia fue: calcio, sodio, magnesio y potasio cuyos valores fluctuaron de 1.1 a 25 mmol dm⁻³, de 1 a 14.3 mmol dm⁻³, de 0.6 a 6.2 mmol dm⁻³ y de 0.1 a 1.2 mmol dm⁻³ con valores promedio de 10, 4.7, 2.6 y 0.6 mmol dm⁻³. Como se observa, las concentraciones de sodio superan a las de magnesio, lo que indica que el sodio soluble está desplazando al magnesio (tabla 13). Estas cantidades de sodio no son altas, pero indican que debe tenerse cuidado con estos suelos, especialmente con la calidad del agua de riego

Respecto a los aniones solubles el orden de abundancia fue: sulfatos, cloruros, bicarbonatos y carbonatos, que se detectaron en concentraciones de 0.2 a 40.3 mmol dm⁻³, de 0.5 a 11.5 mmol dm⁻³, 0.5 a 7.7 mmol dm⁻³ y de 0 a 0.8 mmol dm⁻³ con valores promedio de 15.1, 2.9, 2.8 y 0.5 mmol dm⁻³ respectivamente (tabla 13). Hay presencia de yeso por los altos contenidos de sulfatos solubles y calcio y magnesio en el complejo de cambio lo que puede ayudar a resolver los problemas de alcalinidad, ya que los iones sulfato y los carbonatos reaccionan con los cationes en la solución del suelo formando sales neutras solubles como por ejemplo: tenardita Na₂SO₄, nacolita NaHCO₃, mirabilita Na₂SO₄ 10.H₂O etc.

8.3. Variación del contenido de metales pesados totales en el suelo.

Las cantidades obtenidas de Cu total (extracción con agua regia) fluctuaron de 9 a 28 mg/kg, con una media de 13.2 mg/kg quedando estos valores en un rango más bajo de lo reportado en suelos normales de texturas finas (Fiedler y Roessler, 1988) (tabla 1) El valor promedio es bajo en comparación a lo reportado para suelos del Distrito 03 de Tula con riego con agua residual de 22.58 mg/kg (Siebe-Grabach, 1994b). Es semejante a lo reportado para suelos de temporal en el Distrito de Desarrollo Rural 063 de Tula de 10.9 mg/kg (Siebe-Grabach, 1994a). Pero es más bajo a lo reportado por Flores-Delgadillo et al. (1992) para suelos testigo de la sierra Los Frailes con 33 mg/kg. Esto puede deberse a la forma de extracción (HClO₄ - HF), ya que no sólo se extraen los metales complejados en compuestos orgánicos, adsorbidos u ocultos en carbonatos u óxidos de minerales sino además se disuelven los silicatos primarios El valor promedio es alto en comparación a suelos de riego con agua blanca en el valle del Mezquital (Mascareño, 1974) de 1.88 a 4.90 mg/kg y se encuentra entre lo reportado para suelos regados con agua residual en temporadas de secas del municipio de Pachuca (Flores-Rodríguez, 1993) de 3.5 y 20.8 mg/kg. En ambos métodos la extracción de los metales es con D.T.P.A. y solución diácida de Carolina del Norte por lo que no se trata de la fracción total sino la disponible. El valor del Cu de 10 y 8 mg/kg de los dos primeros horizontes del subgrupo Cambisol gypsi-crómico puede ser considerado como deficiente para un numeroso grupo de cultivos, pero esta deficiencia puede ser corregida con la aplicación de sulfato de cobre (CuSO₄.5H₂O) en forma soluble (Aubert y Pinta, 1977; Flores-Delgadillo, 1987).

Los valores obtenidos de Zn total fueron de 39 a 466 mg/kg, con un valor promedio de 99.2 mg/kg. De acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) se encuentran en una concentración un poco inferior a lo reportado para suelos normales de texturas finas (tabla 1). El valor promedio es semejante a lo reportado para suelos del Distrito 03 de Tula con riego con agua residual de 86.75 mg/kg (Siebe-Grabach, 1994b). Es similar a lo reportado por Flores-Delgadillo et al. (1992) de 98.3 mg/kg para suelos testigo de la sierra Los Frailes. Este valor es alto en comparación a lo reportado para suelos de temporal en el Distrito de Desarrollo Rural 063 de Tula de 44.9 mg/kg (Siebe-Grabach, 1994a) y es más alto para suelos del municipio de Pachuca de 18.82 y 23.25 mg/kg (Flores-Rodríguez, 1993), para suelos de riego con agua blanca en el valle del Mezquital de 0.02 a 0.12 mg/kg (Mascareño, 1974). La alta concentración de zinc en la subunidad Cambisol gypsi-crómico (Rancho Viejo) puede ser debida al aporte adicional, que puede estar en relación a la actividad hidrotermal. Principalmente el zinc se encuentra acumulado en el horizonte Bw (466 mg/kg) siendo los horizontes superiores generalmente pobres. Se observa que en las demás subunidades la distribución del Zn total sigue principalmente a la distribución de arcillas.

El plomo varió de 15 a 37 mg/kg con un valor promedio de 22.8 mg/kg, de acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) se encuentran en una concentración más baja a lo reportado para suelos normales de texturas finas (tabla 1). El valor promedio es semejante a lo reportado para suelos del Distrito 03 de Tula con riego con agua residual de 22.6 (Siebe-Grabach, 1994b), son bajas en comparación a lo reportado para suelos con riego con agua residual del Distrito de Desarrollo Rural 063 de Tula de 85 a 120 mg/kg de Pb extractable con D.T.P.A (Hernández-Silva et al., 1990). El valor promedio es alto en comparación a lo reportado para suelos de temporal en el Distrito de Desarrollo Rural 063 de Tula de 9.9 mg/kg (Siebe-Grabach, 1994a), a lo reportado en suelos de riego con agua blanca en el valle del Mezquital y el ejido de Mixquiahuala de 3 a 5.7 mg/kg (Mascareño, 1974) y Carrillo-González (1990-1991) que reporta metales totales de 11 mg/kg respectivamente. La distribución del plomo entre los diferentes horizontes es semejante a la distribución de la materia orgánica, encontrándose característicamente acumulado en el horizonte superior.

Los valores de cobalto fluctuaron de 16 a 64 mg/kg con un valor medio de 26.8 mg/kg, de acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) se encuentran dentro del rango normal de texturas finas (tabla 1). El valor promedio es alto en comparación con suelos de riego con agua residual en el Valle del Mezquital de 0.53 mg/kg por Mascareño (1974); de 9.4 mg/kg Mejía-Barrón et al. (1990) y de 1 a 2.5 mg/kg Cajuste (1992). Este valor promedio es alto en comparación a los reportados para metales disponibles en suelos de riego con agua blanca del Valle del Mezquital (Mascareño, 1974) de 0.08 a 0.68 mg/kg. La actividad hidrotermal y los procesos pedogénéticos influyen en el aumento en su concentración en la localidad de Rancho Viejo. En la localidad de Yetay sobrepasa un poco el límite del rango normal de texturas finas (34 mg/kg) asociado a los horizontes con contenidos de carbonatos. La concentración alta de cobalto no representa peligro para las plantas ya que la fracción disponible está ligada seguramente a carbonatos o en forma de sulfatos.

Los valores de níquel fluctuaron de 9 a 24 mg/kg con un valor medio de 16.9 mg/kg, de acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) se encuentran en una concentración más baja a lo reportado para suelos de texturas finas. El valor promedio se encuentra entre lo reportado para suelos bajo riego con agua residual de 5.5 a 14.89 mg/kg por Mejía-Barrón et al. (1990). El valor promedio es más alto a lo reportado para metales disponibles en suelos de riego con agua blanca en el valle del Mezquital de 0.03 a 0.23 mg/kg (Mascareño, 1974). El pH no afecta su concentración en los suelos y su distribución, varía en relación al contenido de arcillas.

El contenido de cadmio en el suelo varía de 0.50 a 0.91 mg/kg, con un promedio de 0.62 mg/kg, de acuerdo con Fiedler y Roessler (1988) se encuentran dentro del rango normal para suelos de texturas finas. El valor promedio es similar a lo reportado para suelos del Distrito 03 de Tula con riego con agua residual con 0.58 mg/kg (Siebe-Grabach, 1994b). Es un valor muy bajo en comparación a lo reportado en suelos testigo de la sierra Los Frailes de 2.3 mg/kg (Flores-Delgadillo et al., 1992) donde su alta concentración está condicionada por el método de extracción y su composición mineralógica. El valor promedio es alto en comparación a el reportado para suelos de temporal en el Distrito de Desarrollo Rural 063 de Tula de 0.31 mg/kg (Siebe-Grabach, 1994a), pero es menor a el promedio de la localidad de Denganthzá con 0.88 mg/kg. Es alto en comparación a lo reportado en suelos de riego con agua blanca en el valle del Mezquital de 0.01 a 0.02 mg/kg (Mascareño, 1974). En general su comportamiento en el suelo es homogéneo. El valor más alto de cadmio (0.91) se localiza en la localidad de Rancho Viejo pero sin llegar a concentraciones tóxicas.

La concentración de metales pesados no se halla en exceso en los suelos del valle de Tecozautla, pero su cantidad suficiente puede verse incrementada por el uso excesivo o prolongado de fertilizantes, plaguicidas y fungicidas que pueden contribuir a el incremento de metales pesados en el suelo (Cd, Cu, Zn, Hg etc.). Por ejemplo el Cd se encuentra en concentraciones variables en rocas fosfatadas (fosforita) que es usada en la manufactura de fertilizantes, se han reportado concentraciones de 2 a 156 Cd/kg fertilizante (Alloway, 1990) y el cobre es de uso común en fungicidas.

8.4. Estimación de la capacidad filtro y amortiguadora en los suelos.

Los suelos, mostraron tener una alta capacidad de filtración de partículas suspendidas gruesas (tabla 10a y 10b), debido a que poseen una gran proporción de poros de diámetros entre 1 - 100 nm (Siebe-Grabach et al., 1996).

Para estimar la capacidad de inmovilización o retención (fuerzas de enlace) de los diferentes metales en el suelo, se consideraron distintos factores que propician el movimiento de cada uno de ellos por ejemplo el pH, la textura, la materia orgánica etc. (Blume y Brümmer, 1987 en Siebe-Grabach et al., 1996). Es importante conocer la fuerza de adsorción de los primeros 30 cm, dado que es en estos es donde se desarrollan la mayoría de los microorganismos del suelo y existe mayor cobertura de raíces por área (Siebe-Grabach et al., 1996).

Debido principalmente a la reacción alcalina de los suelos, en las subunidades Calcisol háplico (Pañhé y Yetay) y el Leptosol éutrico (El Bothó) propicia una muy alta fuerza de enlace (tabla 14), favoreciendo la insolubilización de los metales pesados que podrían ser tóxicos (Pb y Cd), pero afectando también la solubilidad de muchos micronutrientes esenciales, como es el caso del Zn, Cu, Ni (imprescindibles para las leguminosas), Co (sólo necesario para los animales), y Mn ya que forman cationes metálicos que precipitan en compuestos poco solubles (Barceló y Charlotte, 1989), pero para aseverar esto, es necesario un estudio de los micronutrientes del suelo.

En las subunidades Feozem háplico (La Mesilla II y Gandho), verti-háplico (San Joaquín) y Leptosol mólico (La Mesilla II), el pH ligeramente ácido a neutro con el aporte de materia orgánica que libera compuestos húmicos solubles, favorecería la solubilización de muchos micronutrientes fijados, aumentando su solubilidad según Porta et al. (1994) (tabla 18).

Como se observa en la subunidad del Cambisol gypsi-crómico (Rancho Viejo) la creciente acidez del suelo favorece su evolución hacia formas móviles. A pH menor de 5.5 empiezan a tomar importancia las policationes a base de aluminio (tabla 18), además de la movilidad de los metales pesados con una fuerza de enlace mediana a muy baja. Como se observa en la tabla 14, el Cd y Zn se encuentran retenidos similarmente en el suelo, el Ni, Cu y Co son similares; en tanto el plomo es adsorbido más fuerte que los demás metales, probablemente ligado a sulfatos o hidróxidos de aluminio (Brown y Thomas, 1983). Coincidiendo con diversos autores, la disponibilidad de nutrientes por las plantas depende del pH del suelo.

7. Conclusiones.

El clima árido a semiárido influye en la evolución del suelo. Las adiciones dominantes en la zona de estudio son la acumulación de la materia orgánica, la calcificación y la salinización.

La alteración de los minerales primarios es muy lenta, esto se debe a que el medio no se acidifica, las arcillas principalmente son del tipo 2:1 y son sobre todo heredadas. Las de tipo 1:1 son de formación *in situ*, se localizan en La Mesilla I y II debido a que es una zona estable, en una posición alta en el paisaje por lo que no recibe aporte de material.

Los altos contenidos de materia orgánica, la alta capacidad de intercambio cationico y el pH alcalino que es característico de estas zonas, favorecen la adsorción e insolubilización de metales pesados en el suelo.

La aridez produce poca lixiviación de elementos, los valores de pH alcalinos y los procesos de hidrólisis limitados. El resultado es que los suelos no maduran. Por lo que, la formación de un horizonte B sólo se presentan en las localidades de Pañhé y Rancho Viejo.

En cuanto a las características edafocológicas de los suelos las principales limitantes son: su baja capacidad de retención de agua, el limitado espacio radicular (Leptosoles, Phaeozems y Calcisoles), la pedregosidad (Rancho Viejo) y la susceptibilidad a la erosión debido a la pendiente y a la cobertura vegetal principalmente en las subunidades Phaeozem háplico (La Mesilla I), Cambisol gypsi-crómico (Rancho Viejo), Leptosol mólico (La Mesilla II) y Leptosol éutrico (El Bothó).

La condición hidrotermal (Cambisol gypsi-crómico), interviene de manera decisiva en la alteración geoquímica del suelo. Acelera la neoformación de óxidos amorfos de Fe y Al que pasan del estado de gel a formas cristalinas y favorece el aporte de metales pesados aumentando su concentración en el suelo.

Los análisis físicos y químicos de los suelos permitieron su clasificación en cuatro unidades principales de suelos y seis subunidades, según la FAO (1988): Phaeozem háplico (La Mesilla I y Gandhó), Feozem verti-háplico (San Joaquín), Calcisol háplico (Panhé y Yetay), Cambisol gypsi-crómico (Rancho Viejo), Leptosol mólico (La Mesilla II) y Leptosol éutrico (El Bothó).

Las concentraciones encontradas para Cu, Zn, Pb, Co, Ni y Cd en Tecozautla están dentro de los rangos considerados como normales para metales totales por Fiedler y Roessler (1988). En comparación a lo reportado para metales totales para suelos testigo sin tratamiento con aguas residuales, su concentración es alta para algunos metales como Zn, Co, y Cd. Esto se debe al aporte de estos metales por la influencia hidrotermal que incrementa su concentración promedio. Las concentraciones promedio de Cu y Cd totales extraídos en suelos de la sierra los Frailes son más altas, sus concentraciones dependen principalmente del material que les da origen y de la solución extractante utilizada.

Esta zona sirve como zona blanco debido a que su litología es similar a varios de los Distritos de Riego del centro del país que se desarrollaron simultáneamente (Terciario - Cuaternario). Sus procesos pedogenéticos dominantes de acumulación (materia orgánica, calcificación y salinidad) y edafoecológicos son característicos de zonas con clima árido a semiárido y la concentración natural de los metales pesados en los suelos no se ve alterada por el agua de riego.

Recomendaciones

Se recomienda la determinación cuantitativa del contenido de yeso presente en los perfiles en posteriores estudios.

Se observó un desplazamiento de magnesio y/o calcio solubles por sodio soluble en los sitios de intercambio con probables efectos negativos sobre la estructura del suelo, por lo que debe tenerse especial cuidado con estos suelos y la calidad del agua de riego, lo que merece ser estudiado a futuro.

Las características edafoecológicas del sitio de estudio se podrían mejorar a través de la adición de materia orgánica (estiércol o residuos de cosechas) para proporcionar mayor retención de agua, nutrimentos y mejorar la estructura superficial del suelo.

Se podrían realizar subsoleos y desempiedre con el fin de aumentar el espacio radicular y secundariamente acelerar los procesos de intemperismo.

La baja capacidad de retención de agua en general se soluciona con el riego. Es importante mantener una cobertura vegetal en la época de lluvia para evitar erosión y un buen manejo del agua de riego para evitar la salinización del suelo en mediano y largo plazo.

Como se mencionó en un principio, es necesario conocer el contenido natural de metales pesados en los suelos, para establecer límites de tolerancia congruentes y para monitorear el incremento de las concentraciones de metales pesados en suelos regados con agua residual. Por ello es necesario estandarizar un método de extracción de metales pesados totales o solubles con el fin de poder comparar los datos así obtenidos y facilitar la observación e interpretación de los mismos.

9. Bibliografía

- Alloway, B.J., 1990, Heavy metals in soils. Blackie. Academic & Professional, Glasgow.
- Aubert, H, y Pinta, M., 1977, Trace elements in soils. Elsevier Scientific Publishing Company. New York.
- Barceló, J. y Charlotte, P., 1989, Estrés vegetal inducido por metales pesados. Investigación y Ciencia. No 154. Prensa científica. Calabria. Barcelona, España: 54-63 p.
- Black, C.A. (eds), 1965, Methods of soil analysis. Part 1 and part 2. Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Inc., Publisher Madison, Wisconsin, U.S.A.
- Blume, H.P., 1990, Handbuch des Bodenschutzes Bodenökologie und-belastung vorbeugende und abwehrende Schutzmassnahmen, Süddeutscher Zeitungsdienst, Germany, 686 p
- Bouwer, C.A., Reitemeier y R. Fireman, 1952, Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils, Soils Sci. 73, 251-261 p.
- Bouyoucos, G.J., 1963, Directions formaking mechanical analyses of soil by hydrometer method, Soil Science 42: 25-30 pp.
- Brown, K.W. y Thomas J.C., 1983, The movement of metals applied to soils in sewage effluent. Water, Air, and Soil Pollution 19. Reidel Publishing Co. Dordrecht. Holland. and Boston. U.S.A.: 43-54 p.
- Buckman, O.H y Brady, C.N., 1991, Naturaleza y propiedades de los suelos, Limusa, México, 169-199 p.
- Cajuste, L.J., 1992, Comparación de los niveles tóxicos de Cd y Pb en suelos con diferente contenido de materia orgánica, En: Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Contaminación de Suelos. México.
- Carrillo-González R. y Cajuste L.J., 1990-1991, En Memoria del XXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Pachuca, Hidalgo, México, 72 p
- Centro Nacional de Estadística Municipal., 1988: Los municipios de Hidalgo. Vol. 13 Secretaria de Gobierno. Hidalgo, México: 208-211 pp.
- CETENAL, 1971, [Hojas] San Juan Del Río (F14 C77), Huichapan (F14 C78), Hidalgo: México D.F., Dirección de Estadística Económica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta Topográfica escala 1:50,000.
- CETENAL, 1972, [Hojas] Tequisquiapan (F14 C67), Tecozautla (F14 C68), Hidalgo: México D.F., Dirección de Estadística Económica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta Topográfica escala 1:50,000
- CETENAL, 1973, [Hoja] Tequisquiapan (F14 C67), Hidalgo: México D.F., Dirección de Estadística Económica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta de Uso de suelo escala 1:50,000.
- CETENAL, 1974a, [Hojas] Tequisquiapan (F14 C67), Tecozautla (F14 C68), San Juan Del Río (F14 C77), Huichapan (F14 C78), Hidalgo: México D.F., Dirección de Estadística Económica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta Geología, escala 1:50,000.
- CETENAL, 1974b, [Hojas] Tequisquiapan (F14 C67), San Juan Del Río (F14 C77), Huichapan (F14 C78), Hidalgo: México D F., Dirección de Estadística Económica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta de Edafología, escala 1.50,000.

- CETENAL, 1974c, [Hojas] Tecozautla (F14 C68), San Juan Del Río (F14 C77), Hidalgo: México D.F., Dirección de Estadística Económica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta de Uso de Suelo, escala 1:50,000.
- CETENAL, 1975, [Hoja] Huichapan (F14 C78), Hidalgo: México D.F., Dirección de Estadística Económica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta de Uso de suelo escala 1:50,000.
- CETENAL, 1977, [Hoja] Tecozautla (F14 C68), Hidalgo: México D.F., Dirección de Estadística Económica. Comisión de Estudios del Territorio Nacional, Carta de Edafología escala 1:50,000.
- 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.
- CSTPA (ed), 1980, Handbook on reference methods for soil testing (revised edition). Council of Soil Testing and Plant Analysis. Athens Georgia, USA.
- Cuanalo, de la, C.H., 1995, La materia orgánica en la génesis de los suelos tropicales, En: Memorias del Simposio Universitario de Edafología, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Dirección de Agrología (ed), 1972, Instructivo para la determinación del clima de acuerdo al segundo sistema de Thornthwaite, Dirección General de Estudios, Dirección de Agrología, Departamento de Estudios Especiales, Secretaría de Recursos Hidráulicos. México, 77 p.
- Dirección General de Geografía., 1983, [Hoja] Pachuca (F14 11), Hidalgo: México D.F., Secretaria de Programación y Presupuesto. Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, Carta Hidrológica: Aguas subterráneas escala 1:250,000.
- Donahue, R.L. et al., 1977. Soils: an introducción to soils and growth. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall.
- Dregne, H.E., 1976, Soil of arid regions, Developments in Soil Science, Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 167-227 p.
- Duchaufour, Ph., 1978, Manual de edafología, Toray-Masson, 476 p.
- Duchaufour, Ph., 1984, 1. Edafogénesis y clasificación. Masson. Barcelona.
- FAO, 1974, Soil map of the world, Vol 1. Leyend-R. Dudal y cols. UNESCO. París.
- FAO, 1988, FAO/UNESCO. Soil map of the world. Revised Leyend. World Resources Report 60, FAO; Rome.
- Fiedler y Roessler (eds)., 1988, Spurenelemente in der Umwelt. Enke-Verlag, Stuttgart.
- Flores-Delgadillo L., 1987, Algunos nutrientes asimilables en diferentes suelos de México, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de maestría, 5-61 p.
- Flores-Delgadillo L., Hernández-Silva G., Alcalá-Martínez R., and Maples-Vermeersch M., 1992, Total contents of cadmium, copper, manganese and zinc in agricultural soils irrigated with wastewater from Hidalgo, México. Revista internacional de contaminación ambiental, 8(1), 37 - 46 p
- Flores-Rodríguez, 1993, Diagnóstico y evaluación de los grados de contaminación de los suelos del transecto Téllez - Pachuca por metales pesados presentes en las aguas

- residuales del río de las avenidas y el colector central de Pachuca, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Tesis de licenciatura, 92 p.
- García, E., 1988, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
 - Guerrero-García, A., 1990, El suelo, los abonos y la fertilización de los cultivos, Ediciones Mundi-prensa, Madrid, España.
 - Grande, L.R., 1974, Métodos para análisis físicos y químicos en suelos agrícolas. Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México, 74 p.
 - Hernández-Silva G., Maples Vermeersch M., Hernández-Santiago D., Solorio-Munguía G y Villareal. G., 1990, Tendencias en la acumulación de metales pesados en los suelos del distrito de Desarrollo Rural 063, Estado de Hidalgo, por efecto del riego con aguas negras. En Memoria del 1^{er} Simposio Nacional de Degradación de Suelo. De. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Distrito Federal, 46-47 p
 - INEGI, 1985, [Hoja] Pachuca (F14 11), Hidalgo: México D.F., Secretaría de Programación y Presupuestos, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta Geología: Efectos climáticos regionales de mayo a octubre y noviembre a abril, escala 1:250,000.
 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática., 1992, Síntesis Geográfica del estado de Hidalgo, Gobierno del Estado de Hidalgo. México.
 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática., 1995a, Cuaderno Estadístico Municipal, Tecozautla, Hidalgo, México, 116 p.
 - Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática., 1995b. Anuario Estadístico del estado de Hidalgo, México, 336 p.
 - Jackson, L.M.L., 1982, Análisis químico de suelos, Omega, Barcelona, España, 662 p.
 - Jeffery, P.G. y Hutchinson, D., 1986, Chemical methods of rock analysis (3^a ed), Pergamon Press, England, 379 p.
 - Jones, B. J. and B. Wolf., 1984. Manual soil testing procedure using modified Morgan extracting reagent, Benton Laboratories Inc. Athens Georgia, U.S.A.
 - Mascareño-Castro F., 1974, Estudio preliminar sobre contaminación de suelos y la producción agrícola en el Distrito de Riego 03, por el uso de aguas negras de la Ciudad de México. Tesis de Maestría, Colegio de Posgraduados, Chapingo, México.
 - Mc Grath S.P., Chang A.C. and A.L. Page, 1994, Land application of sewage sludge, Scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States Environ, Rev. Vol. 2, 108-118 p.
 - Mejía-Barrón M., Sánchez-Beltrán S., Hernández-Silva G., Flores-Delgadillo L, Villareal-Lizárraga. G y Guajardo V., 1990, Metales pesados en maíz (*Zea mays L.*) y alfalfa (*Medicago sativa*) y su correlación con los extractantes de suelos del DDR 063, Hidalgo, En Memoria del 1^{er} Simposio Nacional de Degradación de Suelo. De. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, Distrito Federal, 42-43 p.
 - Mejía, M., 1988, Algunos estudios de suelos yesosos de los municipios: Cedral, Matehuala, Vanegas, Villa de Guadalupe. y Villa de la Paz del estado de San Luis Potosí, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Profesional, 51 p.

- Méndez-García T., 1982, Estudio sobre contaminación de suelos agrícolas del valle del Mezquital Hidalgo, Por A.B.S. (alkil benzen sulfonato); boro y metales pesados por el uso de aguas negras de la ciudad de México, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis Profesional, 133p.
- Moreno, D.R., 1978, Clasificación de pH del suelo, contenido de sales y nutrimentos asimilables. Instituto Nacional de Investigación Agraria - Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, D.F.
- Page, A.L. (ed)., 1982, Methods of soil analysis, Part II Agronomy 9, Madison, Wisconsin USA, p. 194.
- Palmer y Troch., 1977, Introductory soil science laboratory manual (2^a ed), Iowa State University Press.
- Porta, J., López-Acevedo M. y Roquero C., 1994, Edafología para la agricultura y el medio ambiente, Mundi-prensa, España.
- Potash and Phosphate Institute., 1988. Manual de fertilidad de suelos The Potash and Phosphate Institute (P.P.I.), Atlanta Georgia, USA.
- Rendingk vhm Teylor, 1989, Principles of soil of plants, Interaction of plants, McGraw-Hill, Publishing Company, 275 p.
- Richards, L.A. (ed)., 1982, Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos, Limusa, México, 98 p.
- SARH, 1993, Estudio de acopio, comercialización, distribución e industrialización de productos agropecuarios en el valle de Tecozautla, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Delegación del Estado de Hidalgo, Subdelegación de Agricultura Sociedad de Producción Rural de Responsabilidad Limitada Peña Colorada de Gandhó, Bogart Proyecto y construcciones S.A. de C.V., Hidalgo, México. (informe técnico).
- Schlichting, E. y Blume, H.P., 1966, Bodenkundliches Praktikum, Verlag Paul Parey, Hamburg & Berlin, Alemania.
- Schlichting, E., Blume H.P. and K. Stahr, 1995, Bodenkundliches Praktikum (2^a ed), Verlag Paul Parey, Hamburg & Berlin, Alemania.
- Siebe-Grabach, Ch , 1994a, Akkumulation, mobilität und verfügbarkeit von Schwermetallen in langjährig mit städtischen Abwässern bewässerten Böden in Zentralmexiko, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Universität Hohenheim, 181 p.
- Siebe-Grabach, Ch., 1994b, Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula ,Hidalgo, México, Revista internacional de contaminación ambiental, 10(1), 15-21 p.
- Siebe-Grabach, Ch. Jahn, R. y Stahr, K., 1996, Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Publicación Especial, No. 4, 57 p.
- SPP. CGSNEGL., 1983, [Hoja] Ciudad de México (E14 2), Pachuca (F14 11), Hidalgo, Ciudad Juárez (H13 1), Chihuahua: México D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, Carta Topográfica y Geológica, escala 1:250,000.
- SPP. CGSNEGL., 1984, [Hoja] Cuernavaca (E14 5), Estado de México, Orizaba (F14 6), Veracruz: México D.F, Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática, Carta Topográfica y Geológica, escala 1:250,000.

- Strauss, M., 1985, About wastewater reuse in Mexico. Epidemiological Aspects of Use of Wastewater in Agriculture in Mexico, Companion Report: by Ursula J. Blumenthal, LSHTM, London.
- van Reeuwijk, L.P., 1992, Procedures for soil analysis, ISRIC, Wageningen.
- Velasco, de, P.F., 1995, Evolución de la materia orgánica del suelo en ecosistemas terrestres, En: Memorias del Simposio Universitario de Edafología, Universidad Nacional Autónoma de México, México 73-83 p.
- Velasco-Molina, H.A., 1983, Problemario: uso de suelo y manejo del suelo, teoría y laboratorio, Limusa, México.

Tabla 9.- Principales características de Distritos de Riego en los que se aplican aguas residuales.

	Nombre del distrito	Estado	Area regada [ha]	Area total que puede ser regada [ha]	Porcentaje total de riego, con aguas residuales del área total de riego	Tipos de suelo dominantes.	Principales cultivos	Litología dominante	Clima
03	Tula	Hidalgo	43,000	48,000	100	Feozems háplicos, le siguen en importancia los Vertisoles pélicos, y Rendzinas.	Alfalfa, maíz, trigo, avena, tomate, chile.	Ts(volcanoclastica), Q(al), Ts(B-Bv)	BS ₁ kw(i')gw''
09	Cd. Juárez	Chihuahua	3,000	17,500	3.5	Regosoles calcáricos y éutricos, Vertisoles crómicos, Solonchaks órticos.	Algodón, alfalfa, avena, trigo.	Q(al), Q(eólico)	BW kx'(w)(e')
28	Tulancingo	Hidalgo	300	1,100	54	Vertisoles asociados a Planosoles éutricos y Feozems háplicos limitados por tepetates, Luvisoles crómicos, vérticos y órticos.	Pastos, maíz, alfalfa.	Ts(Ta), Ts(B), Q(al).	BS ₁ kw(i')gw''
30	Valsequillo	Puebla	17,600	33,800	58	Vertisoles asociados a Solonchaks, Cambisoles.	Maíz, alfalfa, frijol, chile.	Q(al), Ki(Cg).	BS ₁ kw(w)(i')gw''
88	Chiconautla-Chalco- Texcoco	México	4,300	4,300	100	Feozems háplicos asociados a Vertisoles pélicos. Solonchaks órticos.	Maíz, alfalfa, avena, remolacha.	Q(Tb), Q(al), Q(la)	BS ₁ kw(w)(i')g
100	Alfajayucan	Hidalgo	14,700	28,900	100	Feozems háplicos y Litosoles limitados por fase pedregosa de rocas volcánicas.	Maíz, frijol, trigo, tomates.	Ts(volcanoclastica), Ts(ar-cg), Q(B).	BS ₁ kw(w)(e)gw''

BS_i: climas secos o áridos (el menos seco de entre los que presentan estas características).

BW: climas muy áridos o muy secos.

k: templado con verano cálido

w; w'' estación más seca en el invierno.

w(w) porcentaje de lluvia invernal menor de 5%.

x' lluvias en todos los meses, poco frecuentes pero intensas.

g. mes más caliente en el solsticio de verano

Fuente: Strauss (1985); SPP. CGSNEGI (1983), SPP. CGSNEGI (1984), García (1988).

Q: Cuaternario; Ts: Terciario superior, Ki. Cretácico inferior.

B: basalto; Bv: Brecha volcánica; Ta: Toba ácida; Tb: Toba básica; al: aluvial, la: lacustre, ar-cg. arenisca conglomerado.

Tabla 10a.- Datos del porcentaje de porosidad y retención de agua (pF).

Localidad	Horizonte	Profundidad (cm)	VPT (Vol%)	pF 0 (Vol%)	pF 0.6 (Vol%)	pF 2.0 (Vol%)	pF 2.5 (Vol%)	pF 3.5 (Vol%)	pF 7 (Vol%)
La Mesilla I	Ap ₁	0 - 8	60	57	38	34	26	4.0	0
	Ap ₂	8 - 24	56	55	45	40	32	6.0	0
San Joaquín	Ap ₂	2 - 32	68	64	50	44	36	5.0	0
	Ah ₁	32 - 50	78	73	61	58	48	5.0	0
Pañhé	Ap	0 -17/23	62	61	50	34	29	0.1	0
	BCKw	24/30-50	61	59	52	43	32	0.6	0
Gandhó	Ap	0 -24	63	62	55	36	33	1.0	0
	Ah	24 -48	60	59	54	40	38	1.4	0
Rancho Viejo	Bw	28 - 71	64	62	52	46	40	4.0	0
El Bothó	Ap	0 -27	64	61	46	42	36	9.0	0
Yetay	Ap	0 - 20	60	59	37	34	26	3.0	0
	Ah	20-56/62	60	59	55	47	33	7.0	0
La Mesilla II	A(p)	0 - 26	52	48	40	36	28	8.0	0

CA

dcc

cc

Tabla 10b.- Determinación del balance hídrico, de la distribución de poros, evaluación de la capacidad filtro y amortiguadora.

Localidad	Horizonte	VPT (Vol%)	CA (Vol%)	cc (l/m ²)	dcc (l/m ²)	CF [vol%]	ST [cm ³ /m ²]
La Mesilla I	Ap ₁	60	23	90	78	76.7	3032
	Ap ₂	56	15				2377
San Joaquín	Ap ₂	68	20	134	77	98.6	1686
	Ah ₁	78	15				
Pañhé	Ap	62	27	180	178	80	2044
	BCKw	61	16				
Gandhó	Ap	63	26	178	167	81.6	4566
	Ah	60	19				
Rancho Viejo	Bw	64	16	184	168	47.3	1661
El Bothó	Ap	64	19	110	86	41.3	1702
Yetay	Ap	60	25	258	224	79.3	3380
	Ah	60	12				3291
La Mesilla II	A(p)	52	12	89	69	37.3	2178

VPT: volumen de porosidad total.

CA: capacidad de aireación.

cc: capacidad de campo

dcc: rango de humedad aprovechable.

CF: capacidad de filtrar (dcc + 1/3 CA).

ST: superficie total = $\frac{\% \text{ arcillas}}{100} \times \text{superficie específica de la arcilla dominante (g/m}^2) + \frac{\% \text{ materia orgánica}}{900} \times \text{densidad aparente (Mg/dm}^3)$

Tabla 11: Características de textura en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Tecozautla.

Localidad	Profundidad cm	TIPO DE HORIZONTE	No Muestra	arcilla	limo g/kg	arena	Clasificación
La Mesilla I	0-8	Ap ₁	01.-	439	256	305	Arcilloso
	8-24	Ap ₂	02.-	418	305	277	Arcilloso
	24-51	Ah	03.-	502	246	252	Arcilloso
San Joaquín	0-2	Ap ₁	04.-	479	269	252	Arcilloso
	2-32	Ap ₂	05.-	328	401	271	Franco-arcilloso
	32-50	Ah ₁	06.-	349	418	233	Franco-arcilloso
	50->97	Ah ₂	07.-	308	439	253	Franco-arcilloso
Pañhé	0-17/23	Ap	08.-	366	349	292	Franco-arcilloso
	17/23-24/30	Bk	09.-	456	263	282	Arcilloso
	24/30-50	BCKw	10.-	419	379	202	Arcilloso
	50->66	C	11.-	172	196	632	Franco-arenoso
Gandhó	0-24	Ap	12.-	378	246	376	Franco-arcilloso
	24-48	Ah	13.-	388	226	386	Franco-arcilloso
	48->62	mCw	14.-	123	189	688	Franco-arenoso
Rancho Viejo	0-10	A	15.-	392	223	386	Franco-arcilloso
	10-28	Ahb	16.-	395	240	365	Franco-arcilloso
	28-71	Bw	17.-	397	260	342	Franco-arcilloso
	71-105/124	Cw (naranja)	18.-	302	203	495	Franco-arcillo-arenoso
	71-105/124	Cw (blanco)	19.-	252	242	506	Franco-arcillo-arenoso
	>124	Cy	20.-	283	263	454	Franco-arcillo-arenoso
El Bothó	0-27	Ap	21.-	240	366	394	Franco
Yetay	0-20	Ap	22.-	153	403	444	Franco
	20-56/62	Ah	23.-	322	294	384	Franco-arcilloso
	56/62-82	AC	24.-	372	246	382	Franco-arcilloso
La Mesilla II	0-26	A(p)	25.-	260	357	383	Franco

Tabla 12: Características de permeabilidad, densidad aparente, densidad real y porcentaje de porosidad en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Tecozautla.

Localidad	Profundidad cm	Tipo de Horizonte	Permeabilidad K[cm/h]	Clasificación	d.r. Mg/dm ³	d.a. Mg/dm ³	EP %
La Mesilla I	0-8	Ap ₁	1.8	Moderadamente lento	2.42	1.04	57
	8-24	Ap ₂	1.4	Moderadamente lento	2.09	1.13	46
	24-51	Ah	5.0	Moderado	2.25		
San Joaquín	0-2	Ap ₁	1.3	Moderadamente lento	2.49		
	2-32	Ap ₂	1.5	Moderadamente lento	2.38	0.96	60
	32-50	Ah ₁	0.6	Moderadamente lento	2.16	1.17	46
	50->97	Ah ₂	0.8	Moderadamente lento	2.11		
Pañhé	0-17/23	Ap	1.7	Moderadamente lento	2.10	0.74	65
	17/23-24/30	Bk	3.6	Moderado	2.28		
	24/30-50	BCkw	2.9	Moderado	2.11	1.09	48
	50->66	C	6.1	Moderado	2.01		
Gandhó	0-24	Ap	3.5	Moderado	2.45	1.09	55
	24-48	Ah	3.1	Moderado	2.35	1.14	51
	48->62	mCw	6.5	Moderadamente rápido	2.10		
Rancho Viejo	0-10	A	32.7	Muy rápido	2.41		
	10-28	Ahb	37.5	Muy rápido	2.22		
	28-71	Bw	14.2	Rápido	2.33	1.09	53
	71-105/124	Cw (naranja)	9.7	Moderadamente rápido	2.21		
	71-105/124	Cw (blanco)	5.5	Moderado	2.19		
	>124	Cy	9.3	Moderadamente rápido	2.37		
El Bothó	0-27	Ap	6.4	Moderadamente rápido	2.3	0.99	
Yetay	0-20	Ap	0.2	Lento	2.39	1.01	56
	20-56/62	Ah	0.6	Moderadamente lento	2.25	1.06	53
	56/62-82	AC	2.7	Moderado	2.34		
La Mesilla II	0-26	A(p)	2.2	Moderado	2.30	1.14	50

d.a.: Densidad aparente [Mg/dm³ = g/cm³ = kg/dm³]

d.r.: Densidad real.

EP: Porcentaje de porosidad.

Tabla 13.- Contenido de iones solubles en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Tecozautla.

Localidad	Profundidad cm	Tipo de horizonte	pH	C.E. mScm ⁻¹	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma de Cationes	CO ₃ ⁼	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	Suma de Aniones
					[mmol dm ⁻³]		[mmol dm ⁻³]	[mmol dm ⁻³]	[mmol dm ⁻³]	[mmol dm ⁻³]				
La Mesilla I	0-8	Ap ₁	8.16	0.54	2.6	1.3	1.6	0.4	5.9	0.3	1.5	3.6	0.2	5.6
	8-24	Ap ₂												
	24-51	Ah												
Sn Joaquín	0-2	Ap ₁	8.23	0.44	1.1	0.6	2.6	0.3	4.6	0.3	1.8	2.4	0.2	4.6
	2-32	Ap ₂												
	32-50	Ah ₁												
	50->97	Ah ₂												
Pañhé	0-17/23	Ap	8.34	0.90	2.6	1.3	3.9	0.7	8.5	0.8	4.7	2.1	0.2	7.8
	17/23-24/30	Bk												
	24/30-50	Bckw												
	50->86	C												
Gandhó	0-24	Ap	9.02	2.12	7.4	4.4	7.4	0.1	19.3	3	7.7	2.4	6.6	19.7
	24-48	Ah												
	48->62	mCw												
Rancho Viejo.	0-10	A	7.93	1.57	10.5	3.1	1.5	1.1	16.2	0.3	4.5	0.8	12.0	17.5
	10-28	Ahb	5.98	2.81	21.4	2.6	2.4	0.6	27.0	0	1.2	0.5	39.8	41.8
	28-71	Bw	5.07	1.50	8.5	3.0	2.2	0.5	14.2	0	0.5	0.5	17.8	18.9
	71-105/124	Cw (naranja)	4.96	3.01	20.0	4.9	3.0	1.0	28.9	0	0.5	1.0	40.3	41.8
	71-105/124 >124	Cw (blanco) Cy	4.66	3.00	25.0	4.1	1.0	0.3	30.4	0	0.5	0.6	41.5	42.7
El Bothó	0-27	Ap	8.36	2.15	9.7	2.1	8.5	0.4	20.7	0.5	2.5	11	4.5	19.0
Yetay	0 - 20	Ap	7.78	0.99	3.4	1.0	3.7	0.4	8.5	0.8	5.2	1.1	1.7	8.8
	20-56/62	Ah	8.21	2.27	6.5	2.0	11.5	0.4	20.4	0.5	3.0	11	5.4	19.8
	56/62-82	AC	8.10	3.75	20.7	6.2	14.3	0.5	41.7	0	2.0	2.0	40.0	43.0
La Mesilla II	0 - 26	A(p)	8.33	0.64	2.3	1.0	2.3	1.2	6.8	0.7	3.3	1.5	0.9	6.3

C.E: conductividad eléctrica

Tabla 14: Contenido de iones intercambiables de los perfiles tipo de las unidades de suelo de Tecozautla.

Localidad	Profundidad cm	Tipo de horizonte	pH CaCl ₂ (1:2.5)	Ca ⁺⁺ Mg ⁺⁺ Na ⁺ K ⁺ Al ³⁺ H ⁺ [cmol /kg]				CIC cmol/kg suelo	CIC cmol/kg arcilla	Ca/Mg	Mg+Na %	Yeso %	(campo) CaCO ₃ %		
				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺							Al ³⁺	H ⁺
La Mesilla I	0-8	Ap ₁	6.03	16.5	2.7	0.22	1.1	20	24	6.1	15		0		
	8-24	Ap ₂	6.03	18.7	4.7	0.25	1	25	43	4	20		0		
	24-51	Ah	6.35	20.0	1.7	0.36	0.6	23	32	11.8	9		0		
Sn Joaquín	0-2	Ap ₁	6.63	26.5	10	1.0	0.8	38	64	2.6	28		0		
	2-32	Ap ₂	6.72	30.7	7.2	1.3	0.7	40	105	4.1	21		0		
	32-50	Ah ₁	7.18	35.2	8.7	1.8	0.5	46	116	4	23		0		
	50->97	Ah ₂	7.68	33.7	1.5	1.9	0.7	38	110	22.5	9		0		
Pañhé	0-17/23	Ap	7.59	66.2	9.7	1.4	2.3	79	192	6.8	14		2-10		
	17/23-24/30	Bk	7.60	58.5	7.2	1.4	1.9	69	141	8.1	12		2-10		
	24/30-50	BCKw	7.72	69.5	10	1.8	1.9	83	189	6.9	14		2-10		
	50->66	C	7.64	46.5	21.7	2.0	2.1	72	107	2.1	33		0-0.5		
Gandhó	0-24	Ap	7.34	29.0	5.0	2.1	3.4	31	45	5.8	23		0-0.5		
	24-48	Ah	7.38	22.7	13.2	2.1	1	39	85	1.7	39		0-0.5		
	48->62	mCw	7.23	39.5	10.5	3.2	1.3	54	402	3.8	25		0-0.5		
Rancho Viejo.	0-10	A	6.78	17.2	12.7	0.8	1.1	0	0.1	32	31	1.3	42	0	0-0.5
	10-28	Ahb	4.43	25.7	6.0	0.9	0.5	0.4	0.3	34	43	4.3	20	0.5	0-0.5
	28-71	Bw	3.65	26.2	5.5	1.0	0.7	2.8	0.2	36	79	4.8	18	0	0
	71-105/124	Cw (naranja)	3.72	41	2.5	1.0	0.9	2.6	0	48	146	16.5	7	2	0
	71-105/124	Cw (blanco)	3.19	144	30	1.3	0.8	2.4	0.2	179	695	4.8	17	>5	0
>124	Cy	4.19	107	37.7	1.0	0.6	2.1	0.2	149	552	2.8	26	>5	0	
El Bothó	0-27	Ap	7.83	68.2	4.0	2.2	1.3			73	282	17	8		2-10
Yetay	0-20	Ap	7.78	27.2	14.2	1.3	1.7			44	217	1.9	35		0.5-2
	20-56/62	Ah	7.76	42.7	18.0	2.5	1			62	162	2.4	33		2-10
	56/62-82	AC	7.69	12.7	5.0	2.1	1			17	24	2.5	42		0.5-2
La Mesilla II	0-26	A(p)	6.93	14.7	0.75	0.4	0.8			16	37	19.7	7		0

CIC: capacidad de intercambio cationico.

$$\text{CIC (cmol/kg arcilla)} = \frac{\text{CIC [cmol/kg suelo]} - (3 \times \text{m.o [\%]} \times 100)}{\text{contenido de arcilla [\%]}}$$

Tabla 15: Contenido de fósforo, relación y acumulación de carbón orgánico, materia orgánica y nitrógeno en los perfiles tipo de las unidades de suelo de Tecozautla.

Localidad	Profundidad cm	Tipo de horizonte	P mg/kg	C org g/kg	m.o g/kg	N	C/N	Acc. de m.o kg/ dm ³	Acc. de N
La Mesilla I	0-8	Ap ₁	1.6	18	32	1.2	15	15.9	0.66
	8-24	Ap ₂	0.3	14	23	0.9	15		
	24-51	Ah	0.2	14	23	1.0	14		
Sn Joaquín	0-2	Ap ₁	1.9	15	25	0.7	21	19.5	1.16
	2-32	Ap ₂	2.4	10	18	0.8	12		
	32-50	Ah ₁	2.4	10	18	0.8	12		
	50->97	Ah ₂	8.4	8	14	1.1	7		
Pañhé	0-17/23	Ap	30	17	29	1.4	12	16.8	0.84
	17/23-24/30	Bk	6.4	9	15	0.7	13		
	24/30-50	BCKw	3	7	12	0.8	9		
	50->66	C	1.5	8	13	0.5	16		
Gandhó	0-24	Ap	78	26	46	2.1	12	23.9	0.95
	24-48	Ah	14	11	20	0.9	12		
	48->62	mCw	3.6	9	15	0.1	90		
Rancho Viejo.	0-10	A	2.6	38	66	3.0	13	30.2	1.34
	10-28	Ahb	0.4	32	56	1.8	18		
	28-71	Bw	0.8	9	15	1.0	9		
	71-105/124	Cw	0.6	7	13	0.4	17		
	71-105/124	(naranja) Cw	0.5	7	13	0.6	12		
>124	(blanco) Cy	0.6	3	4	0.2	15			
El Bothó	0-27	Ap	9.6	10	18	1.1	9	6.67	0.35
Yetay	0-20	Ap	3.8	21	36	1.1	19	33.8	0.96
	20-56/62	Ah	1.6	19	32	0.9	21		
	56/62-82	AC	2.8	15	27	0.7	21		
La Mesilla II	0-26	A(p)	1.8	12	21	0.9	13	6.9	0.30

P: fósforo.

C. org: carbón orgánico.

m.o.: materia orgánica.

Acc. de m.o. y N [kg/dm³] = % m.o. x d.a. [kg/dm³] x (100 - %pedras/100) x espesor [dm]

Tabla 16.- Contenido de óxidos amorfos y cristalinos e índices de evolución de suelos del valle de Tecozautla.

Localidad	Profundidad cm	Tipo de horizonte	Fe _o	Al _o	Mn _o	Si _o	Fe _d	Al _d	Mn _d	Fe _d /Fe _o	Al _d /Al _o	Mn _d /Mn _o
			mg /g				mg/g					
La Mesilla I	0-8	Ap ₁	3.1	5.3	0.34	2.7	4.7	20	0.3	1.5	3.8	0.9
	8-24	Ap ₂	2.8	4.8	0.20	1.6	4.1	18	0.4	1.5	3.7	2
	24-51	Ah	3.0	5.1	0.33	2.3	4.8	21	0.3	1.6	4.1	0.9
Sn Joaquín	0-2	Ap ₁	3.1	3.5	0.42	2.2	2.3	15	0.4	0.7	4.3	0.9
	2-32	Ap ₂	2.6	3.6	0.31	1.8	2.3	15	0.4	0.9	4.3	1.3
	32-50	Ah ₁	3.2	4.2	0.39	2.6	0.8	12	0.3	0.2	2.8	0.8
	50->97	Ah ₂	3.4	4.1	0.32	1.9	0.6	11	0.3	0.2	2.7	0.9
Pañhé	0-17/23	Ap	3.1	3.5	0.40	2.7	0.4	7.7	0.2	0.1	2.2	0.5
	17/23-24/30	Bk	2.3	3.2	0.31	2.4	0.4	8.7	0.2	0.2	2.7	0.6
	24/30-50	BCkw	2.6	2.9	0.52	2.3	0.4	7.8	0.4	0.1	2.7	0.8
	50->66	C	1.6	1.8	0.55	1.3	0.1	3.8	0.3	0.06	2.1	0.5
Gandhó	0-24	Ap	2.9	3.2	0.26	2.0	0.5	7.9	0.2	0.2	2.5	0.8
	24-48	Ah	3.4	4.2	0.36	2.6	0.3	9.1	0.2	0.1	2.2	0.5
	48->62	mCw	1.0	2.7	0.28	0.9	0.1	5.7	0.3	0.1	2.1	1.1
Rancho Viejo.	0-10	A	1.1	3.2	0.076	1.9	0.2	11	0.1	0.2	3.4	1.3
	10-28	Ahb	2.8	3.8	0.041	2.2	12	23	0.04	4.2	6.0	1
	28-71	Bw	3.0	2.9	0.007	1.8	12	21	0.006	4	7.2	0.9
	71-105/124	Cw (naranja)	3.4	2.6	0.006	2.1	24	23	0.013	7.1	8.8	2.2
	71-105/124	Cw (blanco)	1.5	2.1	0.003	1.8	13	17	0.008	8.6	8.1	2.6
>124	Cy	1.3	1.6	0.002	1.4	11	23	0.004	8.5	14.4	2	
El Bothó	0-27	Ap	2.2	2.8	0.26	2.0	1.5	8.7	0.3	0.7	3.1	1.1
Yetay	0-20	Ap	2.8	4.3	0.25	3.0	2.5	9.2	0.2	0.9	2.1	0.8
	20-56/62	Ah	2.4	4.4	0.30	2.6	2.4	12	0.3	1	2.7	1
	56/62-82	AC	2.0	3.4	0.29	1.9	2.3	8.7	0.2	1.1	2.5	0.7
La Mesilla II	0-26	A(p)	1.1	2.8	0.26	1.8	2.6	9.1	0.3	2.4	3.2	1.1

Óxidos Amorfos por oxalato: Fe_o, Al_o, Mn_o, Si_o.

Óxidos Cristalinos por ditionito: Fe_d, Al_d, Mn_d.

Tabla 17: Concentración de metales pesados totales (mg/kg), en perfiles tipo representativos de las unidades de suelo de Tecozautla.

Localidad	PROFUNDIDAD cm	Tipo de horizonte	Zn ⁺ (L.d.+0.05)	Cu (L.d.+0.04)	Ni (L.d.+0.07)	Co ⁺ (L.d.+0.8)	Pb ⁺ (L.d.+0.03)	Cd (L.d.+0.1)
La Mesilla I	0 - 8	Ap ₁	41	13	18	19	37	0.60
	8 - 24	Ap ₂	39	12	17	16	29	0.65
	24 - 51	Ah	132	15	20	19	24	0.65
San Joaquín	0 - 2	Ap ₁	87	13	16	21	19	0.50
	2 - 32	Ap ₂	43	12	18	20	19	0.50
	32 - 50	Ah ₁	42	14	17	18	21	0.50
	50 - >97	Ah ₂	49	14	17	28	19	0.50
Pañhé	0 -17/23	Ap	60	15	16	17	24	0.70
	17/23-24/30	Bk	160	12	19	21	24	0.70
	24/30 - 50	BCKw	70	13	18	23	26	0.70
	50 - >66	C	78	13	17	19	22	0.70
Gandhó	0 - 24	Ap	120	28	12	21	25	0.55
	24 - 48	Ah	54	12	13	22	25	0.55
	48 - >62	mCw	91	12	13	21	28	0.60
Rancho Viejo	0 - 10	A	85	10	9	27	32	0.65
	10 - 28	Ahb	53	8	10	19	30	0.65
	28 - 71	Bw	466	13	20	57	16	0.65
	71 -105/124	Cw	206	15	21	64	15	0.75
	71 -105/124	Cw (naranja)	189	10	18	45	16	0.60
	> 124	Cy (blanco)	155	9	13	32	16	0.91
El Bothó	0 - 27	Ap	62	13	20	25	22	0.70
Yetay	0 - 20	Ap	45	14	20	30	20	0.60
	20 -56/62	Ah	51	15	24	29	16	0.65
	56/62- 82	AC	62	15	22	34	17	0.50
La Mesilla II	0 - 26	A(p)	40	11	16	23	29	0.50

L.d.: Limite de detección

18.- Fuerza de enlace de metales pesados en los suelos.

Localidad	Profundidad	Horizonte	pH CaCl ₂	Fuerza de enlace					
				Zn	Cu	Ni	Co	Pb	Cd
La Mesilla	0-8 cm	Ap ₁	6.03	5	>5	>5	5	>5	5
	8-24 cm	Ap ₂	6.03	5	>5	>5	5	>5	5
	24-51 cm	Ah	6.35	5	>5	>5	5	>5	5
San Joaquín	0-2 cm	Ap ₁	6.63	5	>5	>5	5	>5	5
	2-32 cm	Ap ₂	6.72	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	32-50 cm	Ah ₁	7.18	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	50->97 cm	Ah ₂	7.68	>5	>5	>5	>5	>5	>5
Pañhé	0-17/23 cm	Ap	7.59	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	17/23-24/30 cm	Bk	7.60	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	24/30-50 cm	BCKw	7.72	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	50->66 cm	C	7.64	>5	>5	>5	>5	>5	>5
Gandhó	0-24 cm	Ap	7.34	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	24-48 cm	Ah	7.38	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	48->62 cm	mCw	7.23	>5	>5	>5	>5	>5	>5
Rancho Viejo	0-10 cm	A	6.78	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	10-28 cm	Ahb	4.43	2-3	4-5	3	3	>5	2-3
	28-71 cm	Bw	3.65	2	2-3	2	2	4	1-2
	71-105/124 cm	Cw (naranja)	3.72	2-3	3	2-3	2-3	5	2
	71-105/124 cm	Cw (blanco)	3.19	1-2	2	1-2	1-2	3	1
>124 cm	Cy	4.19	2-3	3-4	2-3	2-3	5	2	
El Bothó	0-27 cm	Ap	7.83	>5	>5	>5	>5	>5	>5
Yetay	0-20 cm	Ap	7.78	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	20-56/62 cm	Ah	7.76	>5	>5	>5	>5	>5	>5
	56/62-82 cm	AC	7.69	>5	>5	>5	>5	>5	>5
La Mesilla	0-26 cm	A(p)	6.93	>5	>5	>5	>5	>5	>5

Fuerza de enlace: 0 1 2 3 4 5
 Evaluación: nula muy baja baja media alta muy alta

ANEXO 2

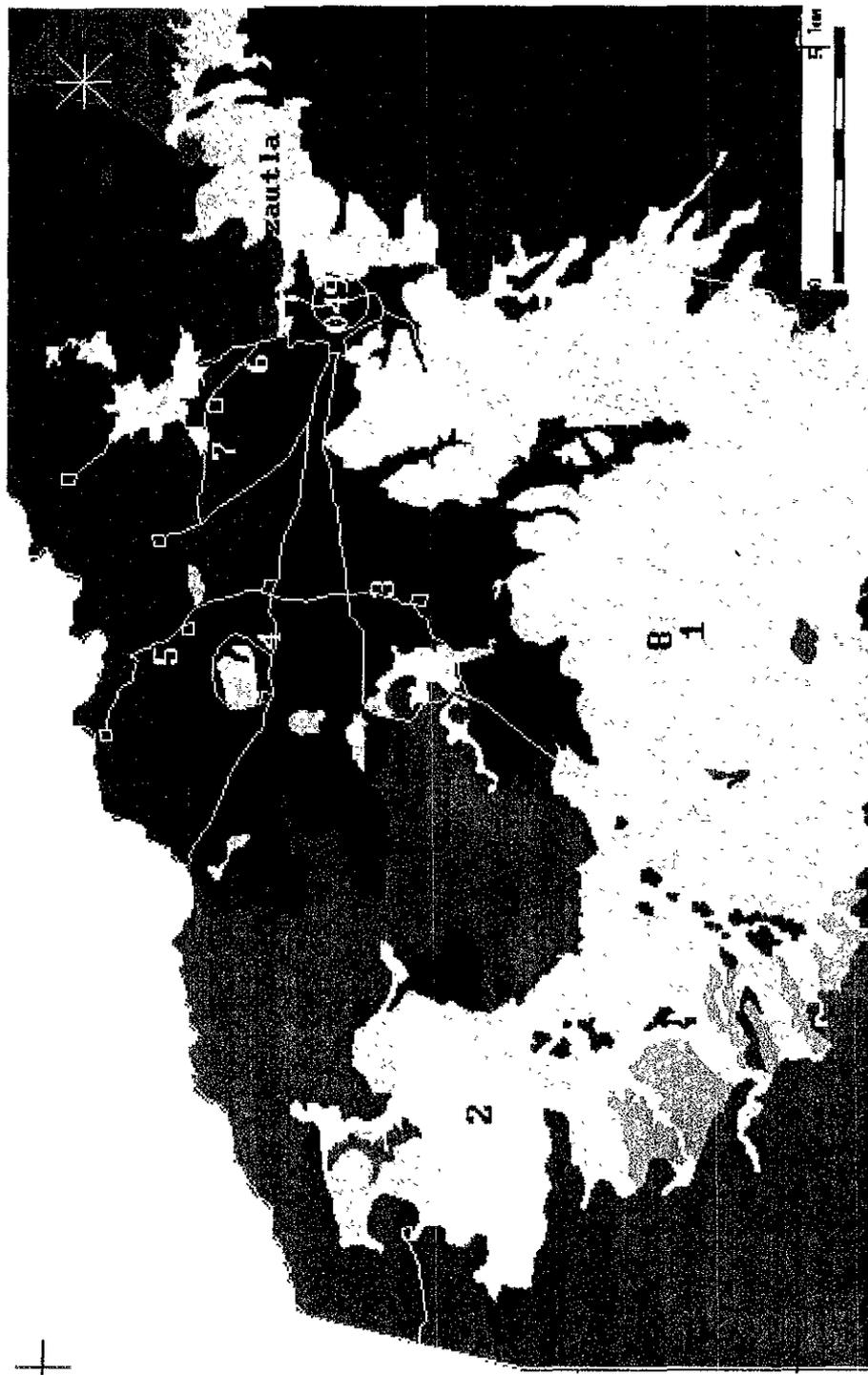
Mapas

Localización de los perfiles representativos de las unidades de suelos.

No. de perfil	Localidad	Subunidad de suelo (FAO, 1988)
1	La Mesilla I	Feozem háplico
2	San Joaquín	Feozem verti-háplico
3	Pañhé	Calcisol háplico
4	Gandhó	Feozem háplico
5	Rancho Viejo	Cambisol gypsi-crómico
6	El Bothó	Leptosol éutrico
7	Yetay	Calcisol háplico
8	La Mesilla II	Leptosol mólico
049	Estación meteorológica	Tecozautla

20935

20927

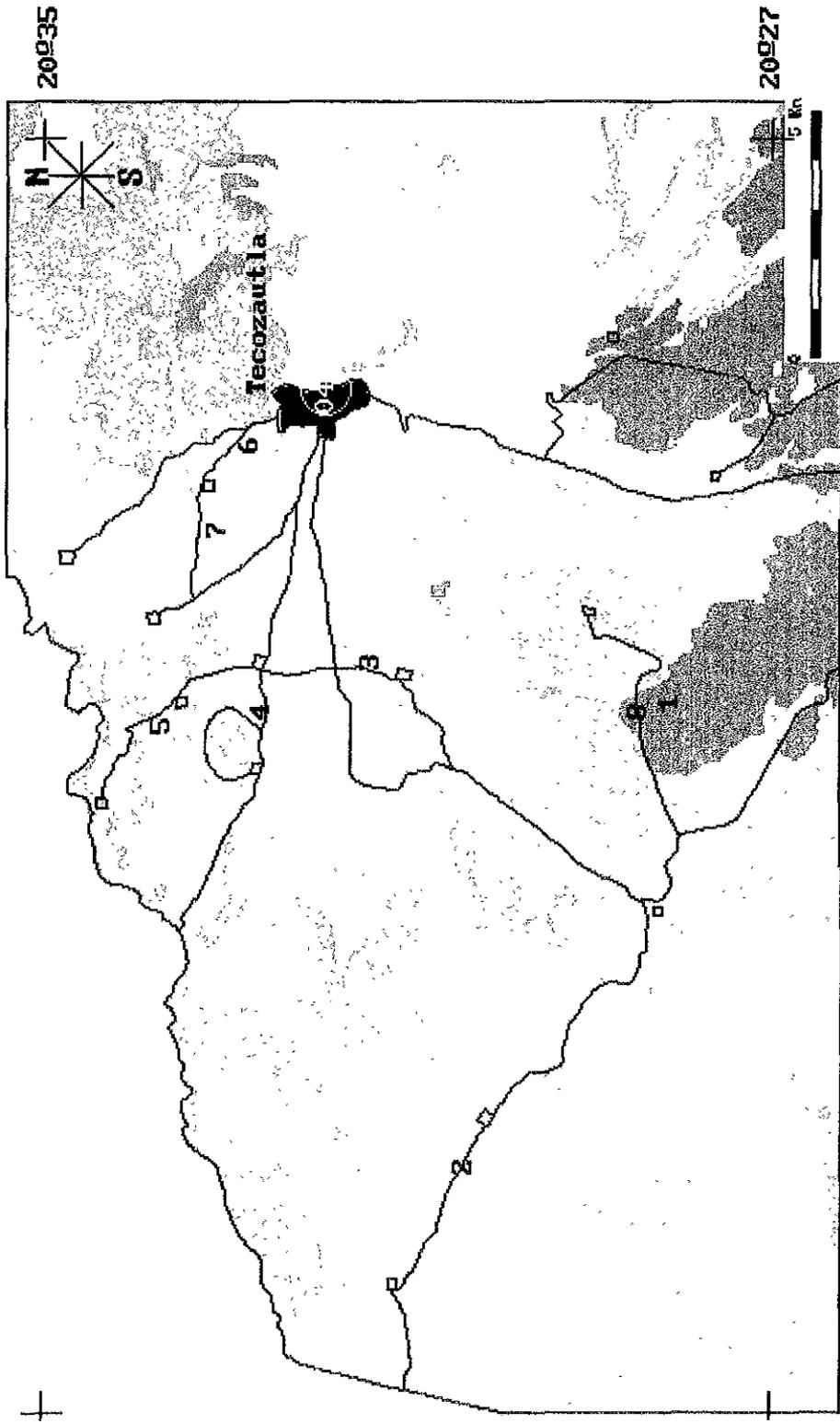


99935

- al=A luvial
- ar=areniscas
- ar-cng=Areniscas-conglomerado
- B=Basaltos
- Bv=Lava volcánica
- cng=Conglomerado
- Iga=Extrusivos ácidos
- Iga-B=Extrusivos ácidos-basaltos
- T=Trachas

Fuente: CETENAL, 1974g

Mapa 2: Geología y litología dominantes en la zona de estudio de Tecozautla, Hgo.

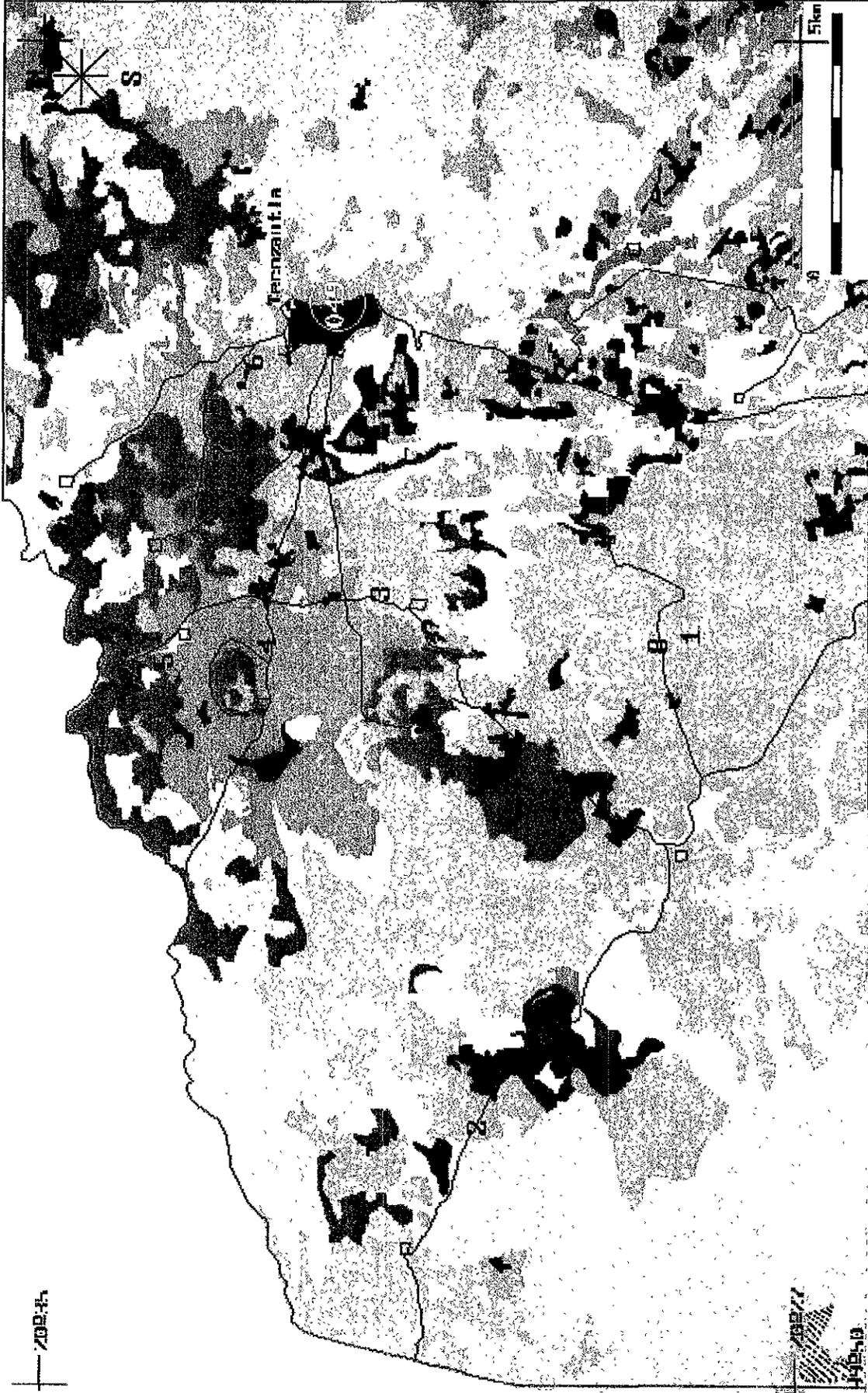


99D50

99D35

-  E-Rendzina
-  Hc=Feozem calcárico
-  Hh=Feozem háplico
-  Hl=Feozem lúvico
-  J=Fluvisol
-  l=Litosol
-  Re=Regosol calcárico
-  Re=Regosol éútrico
-  Vp=Vertisol pélico
-  Xh=Xerosol háplico

Mapa 3: Tipos de suelo dominantes en el valle de Tecozautla, Hgo. Fuente: CETENAL, 1974b
CETENAL, 1977



- | | | |
|----------------------------------|---|-------------------------|
| Ar=Agrícola de riego | EhF(m)=Erosión hídrica de fuerte a moderado | Ms=Materral subinerno |
| At=Agrícola de temporal | FBL(O)=Bosque natural de encino | Pi=Pastizal inducido |
| Ca=Cardonal | Mc=Materral espinoso | In=Pastizal natural |
| CR=Crazi rosaliifolios espinosos | Mi=Materral inerno | S=Vegetación secundaria |

Mapa 4: Uso de suelo correspondiente a la zona de estudio de Tecozautla, Hgo.

Fuente: CENENAL, 1973; CENENAL, 1974; CENENAL, 1975.