



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**EFFECTO DEL AGUA RESIDUAL EN
LOS SUELOS DEL MÓDULO DE
RIEGO “TEPATEPEC”, VALLE DEL
MEZQUITAL**

VÍCTOR MANUEL JUSTO SEGOVIA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2017

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Víctor Manuel Justo Segovia, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

Efecto del agua residual en los suelos del módulo de riego "Tepatepec", Valle del Mezquital.

y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 22 de Noviembre de 2017

Víctor Manuel Justo Segovia

Firma del
Alumno (a)

*cbb.

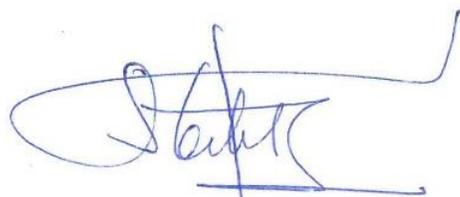
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Efecto del Agua Residual en los Suelos del Módulo de Riego “Tepatepec”, Valle del Mezquital**, realizada por el alumno: **Víctor Manuel Justo Segovia**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
EDAFOLOGIA

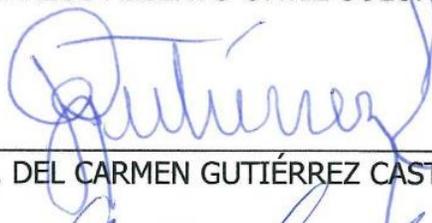
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



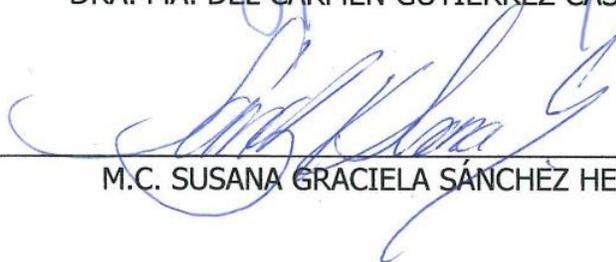
DR. CARLOS ALBERTO ORTIZ SOLORIO

ASESOR



DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

ASESOR



M.C. SUSANA GRACIELA SÁNCHEZ HERRERA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Diciembre de 2017

EFFECTO DEL AGUA RESIDUAL EN LOS SUELOS DEL MÓDULO DE RIEGO “TEPATEPEC”, VALLE DEL MEZQUITAL

Víctor Manuel Justo Segovia, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

El Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, es una zona importante de gran actividad agrícola y pecuaria, cuya principal fuente de productividad se basa en el empleo de aguas residuales provenientes de la zona metropolitana de la ciudad de México. Aunque esta zona ha sido objeto de numerosas investigaciones, la mayoría de los estudios abordan de manera superficial a los suelos. Los estudios etnoedafológicos pueden ser una herramienta útil para determinar con detalle no solo la ubicación de las clases de tierras sino también los cambios en las propiedades del suelo y su desarrollo como resultado del uso prolongado de las aguas residuales. El objetivo de la presente investigación es llevar a cabo un estudio de clases de tierras con base en el conocimiento local, determinar sus propiedades edáficas, y la concentración de metales pesados y clasificar a los suelos taxonómicamente en el módulo de riego Tepatepec, en el Valle del Mezquital, estado de Hidalgo. El estudio Etnoedafológico se llevó a cabo a través de entrevistas con los usuarios. Con la información se elaboró el mapa de clases de tierras. En cada una de ellas se excavó un pozo pedológico y se describió un perfil de suelo. Además, se colectaron muestras inalteradas en los horizontes superficiales y muestras alteradas por cada horizonte. Las propiedades físicas y químicas y presencia de metales pesados se determinaron en el laboratorio. En este trabajo se identificaron 3 clases de tierras: gruesas, delgadas con piedra y delgadas sin piedra., las cuales se clasificaron principalmente como Antrosols como resultado del uso prolongado de aguas residuales e incorporación de sedimentos. La calidad de las clases de Tierra está en función de la fertilidad que tiene y del número de riegos que se aplican, no son susceptibles a erosionarse y presentan una buena agregación. Además, los metales pesados se distribuyen de manera irregular en los horizontes de los suelos analizados, y se presentan en concentraciones que pueden ser peligrosos para la salud.

Palabras clave: *Etnoedafología, Agua Residual, Clasificación de Suelos, Metales Pesados.*

EFFECT OF RESIDUAL WATER ON THE SOILS OF THE IRRIGATION MODULE "TEPATEPEC", IN MEZQUITAL VALLEY

**Víctor Manuel Justo Segovia, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2017**

ABSTRACT

The Valley of the Mezquital, in the state of Hidalgo, is an important area of great agricultural and livestock activity, whose main source of productivity is based on the use of wastewater from the metropolitan area of Mexico City.

In this sense, the objective of the research was to determine the physical, chemical and soil management properties that use untreated wastewater in the irrigation module Tepatepec, in the Mezquital Valley, Hidalgo State.

The first part of the investigation consisted of the Ethnoedaphological study, the elaboration of a Map of Land Classes and interviews to users of the land classes. To check if the soils that make up the land classes are different, a pedological well was excavated in representative sites identified by the producers, where a soil profile was described, soil samples were collected by horizon to perform a laboratory analysis of physical and chemical properties according to the manual for soil analysis of Van Reeuwijk (2002) that allowed to formally classify the soils with the WRB and Soil Taxonomy. The distribution of aggregates was quantified by the method proposed by Savinov (1936) and by the Yoder method. Likewise, the amount of heavy metals present in each horizon of the profiles was determined by atomic absorption spectrophotometry. The thin sections of the samples were determined according to Murphy (1985).

In this work 3 classes of land were identified: thick, thin with stone and thin without stone; It was also determined that the quality of the Earth classes is a function of the fertility that it has and the number of waterings that are applied. The soils of the irrigation module of "Tepatepec" are not susceptible to erosion and present a good aggregation and the amount of heavy metals are distributed irregularly in the horizons of the analyzed soils.

Key words: Ethnoedaphology, Residual Water, Classification of Soils, Heavy Metals.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por el don de la vida y por mostrarme que sus tiempos son perfectos.

Al **CONACyT** y a **todos los mexicanos** por el financiamiento otorgado a esta investigación y al **Colegio de Postgraduados** por haberme brindado todas las herramientas para concluir esta etapa de mi vida.

Dr. Carlos A. Ortiz Solorio su apoyo en este trabajo fue fundamental, sus conocimientos fueron elementales pero su ejemplo de vida fue la herramienta más valiosa que usted me brindo. Por ser MAESTRO pero mejor AMIGO ¡MUCHAS GRACIAS!

M.C Susana G. Sánchez Herrera, usted siempre me motivo a seguir estudiando y sabe lo difícil que fue este paso en mi vida, pero siempre su apoyo incondicional estuvo presente, todos sus aportes y conocimientos marcaron la pauta, toda la vida estaré en deuda.

Dra. Ma. Del Carmen Gutierrez, gracias por ser parte de mi consejo, por sus aportes puntuales y concisos que enriquecieron este trabajo.

Al **M.C. Patricio Sánchez Guzmán**, gracias por todo el apoyo brindado en la parte experimental de este trabajo.

A todas las personas de **Área de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos**, Laboratoristas, compañeros, pero muy en especial a ti **Carmelita** por toda la disposición que siempre mostraste.

A **todos aquellos** que al leer estas líneas se sienten parte de este trabajo MUCHISIMAS GRACIAS.

DEDICATORIA

A ti hijo, el mañana que tengas oportunidad de leer y comprender estas líneas sabrás que siempre has sido y serás parte de mi vida. Animo Vic.

A Mario Segovia porque ocupaste el lugar de un padre en mi vida y tu compañía nunca se alejó de mí, te llevare conmigo todos los días de mi vida.

A mi mama Gume, jamás olvidare que asumiste el compromiso de madre, siempre contaras conmigo. Vuelve pronto.

Padrino, Dios no se equivoca y lo confirmo porque usted se cruzó en mi vida y de mi familia, mis logros son suyos.

A mi madre, porque siempre ha sido un apoyo constante, y a **ti Emilio** échale ganas llega tan lejos como tú te lo propongas.

A ti amorcito, por que juntos lograremos cosas importantes en la vida, porque soportas todo de mi sin duda eres parte de todas mis acciones. Te amo.

A mis abuelos **Victor y Puri** por su ejemplo de vida que ha sido la base para cosechar éxitos en la vida.

A mi hermana, tíos, primos y toda mi familia que se siente orgullosa de mi también es para ustedes.

A mi padre, considérate parte de este logro.

CONTENIDO

Contenido	Pag.
RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE CUADROS.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 ETNOEDAFOLOGÍA.....	3
2.1.1 Definición	3
2.1.2 Estudios Etnoedafológicos	3
2.2 AGUA RESIDUAL	4
2.2.1 Definición	4
2.2.2 Aportaciones de las aguas residuales.....	5
2.2.3 Efectos positivos del uso de las aguas residuales	6
2.2.4 Efectos negativos del uso de las aguas residuales.....	8
2.3 AGREGACIÓN DEL SUELO	11
2.3.1 Generalidades	11
2.3.2 Índices de Agregación	12
2.4 AGREGACIÓN Y POROSIDAD EN SECCIONES DELGADAS DE SUELOS	13
2.4.1 Porosidad.....	13
2.5 VALLE DEL MEZQUITAL.....	14
2.5.1 Generalidades	14
2.5.2 Recurso Suelo	14
III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	16
3.1 OBJETIVOS.....	16

3.1.1	Objetivo General.....	16
3.1.2	Objetivos Específicos	16
3.2	HIPÓTESIS	16
3.2.1	Hipótesis General	16
3.2.2	Hipótesis Específicas.....	17
IV.	MATERIALES Y METODOS	18
4.1	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	18
4.1.1	Localización	18
4.1.2	Clima.....	19
4.1.3	Precipitación	19
4.1.4	Vegetación y uso de suelo	20
4.1.5	Edafología.....	21
4.1.6	Riego y cultivos en el Valle del Mezquital	22
4.2	METODOLOGIA	23
4.2.1	Estudio Etnoedafológico	23
4.2.2	Descripción de perfiles de suelos.....	24
4.2.3	Análisis de laboratorio	24
4.2.4	Análisis de Aguas Residuales	25
4.2.5	Determinación de metales pesados en suelo	27
4.2.6	Agregación del Suelo.....	28
4.2.7	Secciones Delgadas	28
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
5.1	CLASES DE TIERRAS DEL MÓDULO DE RIEGO “TEPATEPEC”	31
5.1.1	Información General	31
5.1.2	Tierra Delgada con Piedra.....	32
	Tierra Delgada Con Piedra y Bajo Rendimiento	32
	Tierra Delgada Con Piedra y Alto Rendimiento	33

5.1.3	Tierra Delgada Sin Piedra	33
	Tierra Delgada Sin Piedra y Bajo Rendimiento	34
	Tierra delgada Sin Piedra y Alto Rendimiento	34
5.1.4	Tierras Gruesas	35
5.2	CARTOGRAFÍA DE CLASES DE TIERRAS	36
5.3	CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	39
5.3.1	Sistema de la Taxonomía de Suelos.....	39
5.3.2	Clasificación de Suelos con el Sistema de la Base Referencial de Suelos (WRB)	42
5.4	CALIDAD DE LAS CLASES DE TIERRAS	44
5.5	ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL DE LOS CANALES ELBA Y REQUENA	49
5.5.1	Resultados de los análisis de las muestras de agua	49
5.5.2	Cálculo del índice de RAS y PSI	51
5.5.3	Cálculo de salinidad efectiva	52
5.5.4	Clasificación de Ayers y Wescot (1987) utilizando CE y los STD	52
5.5.5	Clasificación de aguas según Richards (1954) utilizando CE.....	53
5.6	METALES PESADOS	54
5.6.1	Tierra Delgada con Piedra Bajo Rendimiento	54
5.6.2	Tierra Delgada con Piedra y Alto Rendimiento	56
5.6.3	Tierra Delgada Sin Piedra y Bajo Rendimiento.....	57
5.6.4	Tierra Delgada Sin Piedra y Alto Rendimiento.....	58
5.6.5	Tierra Gruesa.....	60
5.7	ESTABILIDAD Y AGREGACIÓN	61
5.8	ANÁLISIS DE SECCIONES DELGADAS.....	63
5.8.1	Tierra Delgada Con Piedra y Bajo Rendimiento	63
5.8.2	Tierra Delgada Con Piedra y Alto Rendimiento	64
5.8.3	Tierra Delgada Sin Piedra y Bajo Rendimiento.....	64
5.8.4	Tierra Delgada Sin Piedra y Alto Rendimiento.....	65

5.8.5 Tierra Gruesa.....	65
VI CONCLUSIONES	67
VII RECOMENDACIONES.....	68
VIII. LITERATURA CITADA.....	69
ANEXOS	78
Descripción de Perfiles de Suelo.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Ubicación Geográfica del Módulo de Riego “Tepatepec”	18
Figura 4.2 Carta Climática del Módulo de Riego Tepatepec en el estado de Hidalgo (CONABIO, 2010).	19
Figura 4.3 Precipitación del Módulo de Riego Tepatepec en el estado de Hidalgo (CONABIO, 2010).	20
Figura 4.4 Tipo de vegetación y uso de suelo del Módulo de Riego Tepatepec en el estado de Hidalgo (CONABIO, 2010).	21
Figura 4.5 Edafología del Módulo de Riego Tepatepec en el estado de Hidalgo (CONABIO, 2010).	22
Figura 4.6. Producción de secciones delgadas y su visualización (Frank y Mills 2007).	29
Figura 5.1 Tierra Delgada con Piedra y Bajo Rendimiento	32
Figura 5.2 Tierra Delgada con Piedra y Alto Rendimiento.	33
Figura 5.3 Tierra Delgada Sin Piedra y Bajo Rendimiento.	34
Figura 5.4 Tierra Delgada Sin Piedra y Alto Rendimiento.	35
Figura 5.5 Tierra Gruesa	36
Figura 5.6. Módulo de Riego “Tepatepec”	37
Figura 5.7 Clases de tierra en el Módulo de Riego “Tepatepec”.	38
Figura 5.8 Perfiles de las Clases de Tierras.	39
Figura 5.9 Extracción de rollos de pasto.	46
Figura 5.10 Manejo Agronómico.	48
Figura 5.11 Precio de la renta anual de las Clases de Tierra.	48
Figura 5.12 Diagrama de Iones Determinados.	50
Figura 5.13 Distribución de Metales Pesados en Tierras Delgadas con Piedra de Bajo Rendimiento	54
Figura 5.14 Distribución de Metales Pesados en la Tierras Delgadas con Piedra de Alto Rendimiento	56
Figura 5.15 Distribución de Metales pesados en la Tierras Delgadas sin Piedra y Bajo Rendimiento.	57

Figura 5.16 Distribución de Metales pesados en la Tierras Delgadas Sin Piedra y Alto Rendimiento	58
Figura 5.17 Distribución de Metales Pesados en Tierras Gruesas.....	60
Figura 5.18 Estabilidad y Agregación en Húmedo.	62
Figura 5.19 Estabilidad y Agregación en Seco.....	62
Figura 5.20 Porosidad de la Tierra Delgada con Piedra y Bajo Rendimiento.....	63
Figura 5.21 Porosidad de la Tierra Delgada con Piedra y Alto Rendimiento.....	64
Figura 5.22 Porosidad de la Tierra Delgada sin Piedra y Bajo Rendimiento.....	64
Figura 5.23 Porosidad de la Tierra Delgada sin Piedra y Alto Rendimiento.....	65
Figura 5.24 Porosidad de la Tierra Gruesa.	65
Figura 5.25 Porosidad y Agregación de las distintas Clases de Tierras.....	66

LISTA DE CUADROS

Cuadro 4.1 Análisis realizados a las muestras de suelo.	24
Cuadro 4.2 Métodos analíticos utilizados para caracterizar las aguas residuales. 25	
Cuadro 5.1 Clases de Tierras en el Módulo de Riego “Tepatepec”.....	38
Cuadro 5.2 Clasificación de suelos que integran a las clases de tierra del módulo de riego “Tepatepec” con la Taxonomía de Suelos.....	41
Cuadro 5.3 Clasificación con la Base Referencial de Suelos de las clases de tierra en el módulo de riego “Tepatepec”.	43
Cuadro 5.4 Análisis de Fertilidad de las Clases de Tierra.....	45
Cuadro 5.5 Localización de las Muestras de Agua.	49
Cuadro 5.6 Determinación de pH y Conductividad Eléctrica (mmhos/cm).	49
Cuadro 5.7 Determinación de Aniones y Cationes.....	50
Cuadro 5.8 Determinación de residuo seco evaporado, residuo seco calcinado y solidos totales disueltos.	51
Cuadro 5.9 Cálculo de la Relación de Adsorción de Sodio, Porcentaje de Sodio Intercambiable y su clasificación.....	51
Cuadro 5.10 Resultados de la Salinidad Efectiva de las Muestras de Agua.	52
Cuadro 5.11 Criterios de clasificación de Ayers y Wescot (1987).	52
Cuadro 5.12 Resultados de la clasificación según Ayers y Wescot (1987).	53
Cuadro 5.13 Clasificación respecto a la conductividad eléctrica.	53
Cuadro 5.14 Claves de los sitios de muestreo.	61

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el recurso hídrico es cada vez más escaso en el mundo sobre todo en las regiones áridas y semiáridas, por ello es fundamental el manejo adecuado de cualquier fuente de suministro de agua (Page y Chang, 1981). Una alternativa ha sido el uso de aguas residuales no sólo para el sector industrial sino también para el agrícola, el cual a su vez demanda de más y mejores productos alimenticios de origen animal y vegetal (Mará y Cairncross, 1990). La tendencia de reutilización del agua puede deberse a una actitud conservacionista y sanitaria, acorde a un pensamiento de protección al ambiente, donde algunos países desarrollados les dan un tratamiento primario y luego la reciclan en pequeñas cantidades, y con ello aminoran la escasez de este recurso para la sobrevivencia y el desarrollo de los seres vivos. No obstante, en algunos países como México el agua residual se utiliza directamente en el desarrollo local o regional, empleándola principalmente, en actividades agropecuarias (Garza, 1994). De hecho, nuestro país es el segundo que emplea más agua residual para el riego en grandes extensiones agrícolas; principalmente en los distritos de riego cercanos a las grandes urbes. En estos distritos se cultivan especies vegetales de consumo básico en aproximadamente 350,000 ha (Mará y Cairncross, 1990). Por ello, el Instituto Nacional de Ecología (INE), estima que alrededor de 44.3% de las aguas residuales generadas en México, son utilizadas en la agricultura. El problema radica es que estas aguas no reciben ningún tratamiento (SEDESOL / INE, 1993).

El clima árido del Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, es una limitante para la producción agrícola, por lo que las aguas residuales para el riego resultaron un alterativa para incrementar la producción de las tierras laborales (Mendoza, 1981). Además, debido a su cercanía con la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, una de las urbes más grandes del planeta, las aguas residuales resultaron una excelente oportunidad para resolver el problema de la falta de agua en el valle. El uso del agua residual se inició hace más de 100 años y actualmente se riegan por inundación más de 130 000 ha, dentro del Distrito de

Desarrollo Rural 063 (DDR-063) y los Distritos de Riego 03-Tula y 100-Alfajayucan.

Las aguas residuales son altamente valoradas por los agricultores debido a que sus características físicas y químicas han mejorado la calidad y fertilidad de los suelos de este Valle. Asimismo, ha permitido el aumento de su rendimiento en cultivos como alfalfa, cebada, maíz, frijol, calabaza, etc. A nivel nacional (INEGI, 1994).

El problema es que este tipo de aguas pueden contener concentraciones importantes de contaminantes orgánicos e inorgánicos entre ellos, bacterias coliformes, residuos orgánicos, minerales, metales pesados y otros compuestos tóxicos. La acumulación de estos contaminantes está provocando el deterioro de los suelos de forma temporal o definitiva y están modificando sus propiedades físicas y químicas. Al final, están afectando negativamente a los cultivos y plantas de interés económico y de consumo en la región (Ibáñez-Huerta, 1997).

Por otra parte, debido a que los productores del distrito de riego han utilizado el agua residual por más de 100 años, cuentan con amplia experiencia sobre su uso y manejo. Además, el contacto directo con sus tierras les permite conocer con detalle sus características y su ubicación geográfica. Es por eso que en esta investigación se está planteando realizar un estudio etnoedafológico con el fin de conocer el conocimiento local no solo del manejo de las aguas residuales sino también de las diferentes clases de tierras en el Módulo de riego "Tepatepec"; asimismo, establecer la clasificación científica de los suelos para una caracterización más detallada y conocer los factores de formación para determinar la influencia del hombre en los procesos edáficos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ETNOEDAFOLOGÍA

2.1.1 Definición

La Etnoedafología se considera como la disciplina que se encarga de estudiar los conocimientos que los productores poseen sobre el recurso suelo (Ortiz y Gutiérrez, 2001). De acuerdo con Williams y Ortiz (1981), el término Etnoedafología se usa en un sentido más amplio y se puede aplicar a:

- ✓ La percepción campesina de procesos y propiedades del suelo.
- ✓ Taxonomía y clasificación campesina del suelo.
- ✓ Teorías y explicaciones campesinas de la dinámica de las propiedades del suelo.
- ✓ Manejo del suelo.
- ✓ Percepciones de las relaciones entre los dominios (reinos) del suelo y de las plantas.
- ✓ Comparaciones entre ciencia de suelo campesina y técnica.

2.1.2 Estudios Etnoedafológicos

Con los estudios Etnoedafológicos de acuerdo a Ortiz *et al.* (2005), se pueden elaborar mapas de las clases de tierras reconocidas por productores a través de entrevistas a los productores y obtener información local sobre su uso, manejo y problemática. Además, con los mapas de clases de tierras se puede sustituir a los levantamientos de suelos ya que se pueden realizar de una manera más rápida, simple y con menos recursos, y son de alta precisión en sus linderos.

Los levantamientos detallados de suelos se han utilizado a nivel internacional para delimitar los diferentes suelos a un nivel muy preciso y dar recomendaciones de su comportamiento bajo diferentes niveles de manejo. No obstante, este tipo de estudios técnicos de suelos son costosos, requieren de tiempo y, sobre todo, de

personal altamente especializado, por lo que en nuestro país no se han llevado a cabo.

En nuestro país existe una larga tradición de conocimiento local de tierras que data desde épocas prehispánicas (Williams y Ortiz, 1981). En este sentido, el productor conoce las características de sus tierras, sabe cómo diferenciarlas, establece su ubicación geográfica y cuenta con amplia experiencia sobre su uso y manejo; es decir, la gente de campo puede indicar cómo son, dónde están y para qué se emplean las distintas clases de tierras, que es lo que se busca al efectuar un levantamiento de suelos (Ortiz y Gutiérrez, 1999). La limitante es que no realizan una Cartografía Formal, pero se ha podido superar este inconveniente a través del apoyo técnico o científico (Ortiz *et al.*, 2005).

Lo que se quiere puntualizar es que más que una confrontación de conocimientos, que resultaría irrelevante, lo que se desea es la cooperación entre ellos, a través de su mezcla, entendida como una mezcla física; es decir, como si uniéramos agua y suelo formando un lodo y ese lodo continúa siendo agua y suelo. En otras palabras, se unen los conocimientos, pero cada uno mantiene sus características propias (Ortiz *et al.*, 2005).

2.2 AGUA RESIDUAL

2.2.1 Definición

De acuerdo con la **Norma Oficial Mexicana (NMX-AA-3-1980)**, el *agua residual* es el líquido de composición variada proveniente de usos municipal, industrial, comercial, agrícola, pecuario o de cualquier otra índole, ya sea pública o privada y que por tal motivo haya sufrido degradación o alteración en su calidad original.

El término aguas residuales se utiliza para caracterizar diferentes cualidades, que van desde aguas residuales crudas, hasta las diluidas generadas a partir de diversas actividades urbanas. Estas actividades consideran a las aguas residuales de uso doméstico, comercial, industrial, pluvial, además de las corrientes de agua

urbana, aguas residuales tratadas, aguas residuales recuperadas, lodos y biosólidos fecales (Saravanan *et al.*, 2011).

2.2.2 Aportaciones de las aguas residuales a los suelos

Generalidades

El uso de aguas residuales en la agricultura de riego es una práctica que se ha llevado a cabo desde hace mucho tiempo, sobre todo en países de regiones áridas y semiáridas, aunque pueden ser una amenaza para la salud humana (Srinivasan y Reddy, 2009). De acuerdo con Belaid *et al.* (2012), los usuarios de las aguas residuales están conscientes de las desventajas potenciales de la reutilización de las mismas, principalmente por la presencia de patógenos en las cosechas y su composición química en donde se pueden presentar concentraciones de metales pesados.

A nivel mundial, después de la República Popular de China, México es el segundo país que más agua residual emplea para el riego de grandes extensiones agrícolas, en donde se cultivan especies vegetales de consumo básico y forrajero (Mará y Cairncross, 1990). Además, por la rapidez de la urbanización y formación de mega urbes también se está comenzando a utilizar en la agricultura urbana, a pesar de los riesgos asociados con la salud humana y el medio (Winpenny *et al.*, 2013).

En nuestro país, desde hace 118 años se comenzó a utilizar las aguas residuales en la agricultura, específicamente en el Valle del Mezquital, estado de Hidalgo. A principio del siglo XX, las aguas residuales eran de origen doméstico y probablemente con bajas cantidades de metales pesados. No obstante, durante la segunda mitad de siglo, y el creciente desarrollo industrial, las aguas residuales comenzaron a contener metales pesados (Belaid *et al.*, 2012).

En los siguientes párrafos se enuncian las aportaciones y los prejuicios que causan las aguas residuales en: la materia orgánica, nitrógeno, fósforo, compactación, salinidad y sodicidad y metales pesados en los suelos.

2.2.3 Efectos positivos del uso de las aguas residuales

Materia Orgánica

Con el uso de aguas residuales para la producción agrícola se puede incrementar el contenido de materia orgánica y nutrientes en los suelos, lo cual contribuye a mantener o mejorar su fertilidad, pero también pueden causar efectos nocivos que deterioran su calidad (González *et al.*, 2014). La dinámica de la materia orgánica en el suelo desempeña un papel importante debido a la descomposición de la misma ya que controla la disponibilidad de nutrientes, además de tener influencia en la liberación de moléculas orgánicas e inorgánicas que están enlazadas. Por lo tanto, la incorporación de la materia orgánica contenida en las aguas residuales puede modificar y mejorar las características químicas y fertilidad del suelo (Zamora *et al.*, 2009). Asimismo, el potencial de acumulación de metales pesados se puede modificar por la presencia de material orgánico. Al respecto, Hernández (1994) reportaron en una serie de suelos en Tepatepec, Hidalgo una menor acumulación de metales pesados que en los suelos de Progreso, Hidalgo, debido a que en esta zona existe un potencial más bajo de solubilización por la presencia de altos contenidos de materia orgánica.

Rivera Vargas (2012) reportó porcentajes de MO de hasta 11% en el distrito de riego Insurgentes, estado de México a causa del uso de las aguas residuales y una baja disponibilidad de metales pesados a pesar del uso prolongado de las mismas.

Nitrógeno

El nitrógeno es un nutriente esencial para todas las formas de vida y pequeños cambios en las concentraciones de nitrógeno biológicamente posible pueden afectar drásticamente los niveles de la vida de animales y plantas. El nitrógeno contenido en las aguas residuales puede estar presente bajo diferentes especies químicas como amoníaco (NH_3) en forma no ionizada que es tóxica y la forma ionizada (ion amonio, NH_4^+) relativamente no tóxica (Molins-Legua *et al.*, 2006).

En las aguas residuales urbanas la forma de nitrógeno amoniacal sirve como nutriente a los microorganismos, incorporándose a su masa en el proceso de crecimiento biológico. Con la muerte de la biomasa, una fracción de este nitrógeno amoniacal se libera y regresa al agua; mientras que otra fracción queda fija en los microorganismos en la forma de nitrógeno orgánico y se elimina del sistema por la purga.

La eliminación biológica del nitrógeno contenido en el agua residual se lleva a cabo en dos etapas, en la primera, tiene lugar el proceso de nitrificación, o lo que es lo mismo, la transformación de amonio a nitrato; mientras que, en la segunda, la desnitrificación, que es la reducción de nitrato a nitrógeno gaseoso (Cervantes-Carrillo *et al.*, 2000).

Fósforo

Las aguas residuales urbanas suelen contener de 5 a 20 mg/L de fósforo total, del cual entre 1-5 mg/L es orgánico y el resto es inorgánico. La contribución individual tiende a aumentar el contenido de fósforo ya que es uno de los principales constituyentes de los detergentes sintéticos y puede estar presente en contenidos que van desde 0.65 y 4.80 g/habitante al día con una media de unos 2.18 g. De acuerdo con Metcalf y Eddy (1991), el fósforo suele encontrarse en soluciones acuosas como:

- Ortofosfatos: disponible para el metabolismo biológico sin posteriores disociaciones.
- Polifosfatos: moléculas con 2 o más átomos, oxígeno y en algunos casos átomos de hidrógeno combinados en una molécula compleja. Normalmente, los polifosfatos experimentan un proceso de hidrólisis y se transforman en ortofosfatos. Este proceso suele ser muy lento.

Normalmente, el tratamiento secundario, que suele ser de naturaleza biológica puede eliminar de 1 a 2 mg/L lo que significa un incremento de su contenido en el efluente final, causando efectos de eutrofización en las aguas superficiales. Para

resolver este problema, la nueva legislación ha declarado que la concentración máxima de descarga de fósforo en aguas sensibles no debe ser superior a 2 mg/L (Metcalf y Eddy, 1995).

El fósforo se encuentra presente en las aguas residuales domésticas principalmente como fruto de su uso en detergentes o como parte de las excreciones humanas. De hecho, las heces y la orina humana están compuestas entre 3 y 5 % y entre 2 y 5% de fósforo, principalmente en la forma de P_2O_5 . La concentración típica del nutriente en las aguas residuales domésticas suele oscilar entre 6 y 20 mg/L en la forma de fósforo total (Correia *et al.*, 2013).

2.2.4 Efectos negativos del uso de las aguas residuales

Generalidades

Aunque el uso de aguas residuales en riego agrícola presenta ventajas como el incremento de nutrimentos como nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica; además de proporcionar humedad a los cultivos, también se presentan desventajas como la introducción de metales pesados, salinización, compactación, o contaminación biológica. Aunada a esto la proliferación de microorganismos, los procesos de descomposición, la presencia de vegetación acuática, mohos, hongos y la reducción de sulfatos a sulfuros, en condiciones anóxicas.

Metales pesados

Dentro de algunos componentes presentes en el agua residual están los metales pesados, los cuales son un conjunto de elementos químicos metálicos que tienen alta densidad y son tóxicos o venenosos en concentraciones incluso muy bajas. Ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), y plomo (Pb), entre otros (Lucho *et al.*, 2005).

De acuerdo con la Agencia de Protección ambiental (EPA, 2004), el plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As), níquel (Ni), cobre (Cu) y zinc (Zn) son los metales pesados que más efectos nocivos tiene al ambiente y al ser humano. Otros elementos el cromo (Cr), mercurio (Hg) y plata (Ag) esenciales para la planta pero

que en altas concentraciones resultan tóxicos para los organismos vivos (Spain *et al.*, 2003).

Dentro de los metales pesados, los denominados oligoelementos, pueden servir como micronutrientes para los cultivos, ya que son requeridos en pequeñas cantidades y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Sobrepasando cierto umbral se vuelven tóxicos; ejemplo de ellos son el B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Fe, Se y Zn y el metaloide As. También hay metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva problemas en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos, elementos tales como el Cd, Hg, Pb, Sb, Bi, Sn, Tl (García y Dorronsoro, 2005).

Los metales pesados se van depositando en el suelo mediante los riegos con aguas residuales y se van acumulando hasta alcanzar concentraciones que rebasan los límites máximos permitidos, de tal manera que afectan el desarrollo y crecimiento de las plantas, causando daños irreversibles. Bajo estas condiciones se emplea el término de suelos contaminados por metales pesados (Martín, 2000). Una vez en el suelo, los metales pesados pueden quedar retenidos, pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Pagnanelli *et al.*, 2004). Las vías para que se lleve a cabo estos procesos son que queden retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo u ocupando sitios de intercambio; que sean adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo; que se asocien con la materia orgánica del suelo y por último, que se precipiten como sólidos puros o mixtos (García y Dorronsoro, 2005).

Los factores que influyen en la movilización de metales pesados en el suelo son: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio (catiónico y/o aniónico), presencia de carbonatos, materia orgánica, textura, entre otras (Prieto *et al.*, 2009).

En el Valle del Mezquital se han reportado concentraciones de 21-96 mg kg⁻¹ para Cu, 26-57 mg kg⁻¹ para Ni, 8-86 mg kg⁻¹ para Pb y de 66-391 mg kg⁻¹ para Zn (Acosta-Alvarez, 2010). Esto significa que, en Valle del Mezquital, la acumulación de metales pesados es de tres a seis veces superior con respecto a la que ocurre en suelos no irrigados con agua residual (Siebe, 1994).

Efecto del sodio en el suelo

Los aspectos de salinidad y sodicidad han sido considerados muchas veces como secundarios en la mayoría de los estudios en aguas residuales como riego, ya que no representan un riesgo directo sobre las personas; sin embargo, es un peligro a mediano y largo plazo, que puede disminuir la productividad del suelo (reducción de la permeabilidad e infiltración) y el rendimiento de los cultivos si no se considera de forma oportuna (Beltrán, 1999; Deniz *et al.*, 2010). En México, estudios realizados en la región del Valle del Mezquital han reportado la presencia de algunas zonas con saturación de sodio y altos niveles de salinidad (Jiménez *et al.*, 2005).

Taponamiento de poros del suelo

Siegrist y Boyle (1987), mencionan que la obstrucción del suelo es un fenómeno que puede estar relacionado con la infiltración de las aguas residuales con sedimentos en suspensión y que puede afectar significativamente el rendimiento del sistema. No obstante, un cierto grado de obstrucción del suelo puede mejorar el tratamiento de aguas residuales a través de procesos bioquímicos, físicos y químicos; pero la obstrucción severa del suelo puede conducir a la disfunción hidráulica.

Siegrist y Boyle (1987) que la composición de las aguas residuales y la tasa de carga hidráulica son dos parámetros que se pueden controlar fácilmente a través un pre-tratamiento de aguas residuales o mediante el área de la superficie del suelo. Desafortunadamente, las relaciones entre la tasa de efluente, la carga y la obstrucción del suelo no se conocen bien. Sin embargo, este enfoque de diseño informal ha dado lugar a la disfunción hidráulica y la disminución de la renovación

de las aguas residuales en muchos sistemas, incluyendo varias instalaciones a escala comunitaria

2.3 AGREGACIÓN DEL SUELO

2.3.1 Generalidades

La agregación del suelo se define como un grupo de dos o más partículas primarias que presentan una cohesión mucho más fuerte entre ellas, que con las partículas que las rodean (Hillel, 1988; Porta *et al.*, 1999). La agregación del suelo es un producto de interacciones entre la comunidad microbiana, componentes orgánicos e inorgánicos, y de la presencia de plantas sobre la superficie de la tierra (Tisdall y Oades, 1982).

Brady y Weil (1999) mencionan la existencia de cuatro niveles de organización jerárquica de los agregados, los cuales fueron elaborados por Oades (1993) y Tisdall (1994) y se reportan a continuación:

- a) Macroagregados que están compuestos por varios microagregados, unidos por hifas y raíces finas.
- b) Microagregados que están constituidos principalmente por granos finos de arena y grupos más pequeños, limos y arcillas, unidos principalmente por la actividad microbiana, restos orgánicos, raíces e hifas.
- c) Submicroagregados integrados por partículas finas de limo incrustadas en restos orgánicos y restos microbianos, incluso también con arcilla, humus y óxidos de Fe o Al.
- d) Conglomerados de Arcilla, unidos por la interacción con óxidos de Fe o Al y a escalas más pequeñas con polímeros orgánicos.

2.3.2 Índices de Agregación

Estado Estructural del Suelo (EES)

El estado estructural del suelo (EES) se define como la relación entre las fracciones mecánicas dotadas de capacidad cementadora y las fracciones mecánicas que participan como material pasivo en la formación de la estructura (Kaúrichev, 1984). La evaluación se hace desde una perspectiva agronómica y es igual a la relación entre el peso de los agregados de tamaño óptimo (0.25 a 4.75 mm) y el peso total de la muestra. A mayor valor del estado estructural del suelo corresponde una mayor capacidad de estructuración. El EES ha sido empleado en México para evaluar diferentes sistemas de manejo y unidades de suelo (Lomelí, 1996; Navarro *et al.*, 2000; Sustaita-Rivera *et al.*, 2000) observándose que este índice es importante para el entendimiento de la capacidad de estructuración que puede tener un suelo.

Índice de Estabilidad de Agregados (ASI)

Las evaluaciones del estado de la agregación del suelo y la estabilidad de agregados del suelo se han estudiado a través de varios índices como el diámetro medio geométrico, diámetro medio ponderado, estado estructural del suelo, el peso del diámetro medio, el coeficiente de agregación y por la pérdida de arrastre. Sin embargo, no existe una aceptación universal que mencione cuál de éstos se deba preferir o utilizar en determinados casos. Niewczas y Witkowska (2003) proponen el índice de estabilidad de agregados (ASI) como una nueva herramienta para comparar los cambios de la agregación del suelo causada por diferentes factores o procesos de destrucción. Este procedimiento puede ser utilizado con distintos métodos de determinación de estabilidad de agregados.

El indicador ASI presenta las características siguientes:

- a) Expresa numéricamente la destrucción de los agregados del suelo como un resultado de la actividad de diferentes factores o procesos, por ejemplo, el efecto del agua y manejo.

- b) Hace posible incorporar un rango amplio de resultados de los análisis de agregación obtenidos por diferentes métodos y evaluar su descomposición.
- c) De los valores obtenidos, le permiten a uno determinar directamente la estabilidad de agregados; por ejemplo, las estabilidades de agregados más altas deben corresponder con los valores más altos del índice.
- d) Se puede determinar la estabilidad de cada clase de agregados, así como de toda la muestra completa de suelo.
- e) Es el primer indicador de estabilidad de agregados que se evalúa a partir de la distribución de agregados (antes del impacto) y la estabilidad de agregados (después del impacto).

2.4 AGREGACIÓN Y POROSIDAD EN SECCIONES DELGADAS DE SUELOS

Bullock *et al.* (1985) define a la micromorfología como una rama de la edafología que se relaciona con la descripción, interpretación y principalmente con la medición de los componentes, rasgos y el arreglo de los constituyentes (fábrica) de los suelos a un nivel microscópico. La micromorfología de suelos ofrece datos exactos *in situ* de la zona de estudio, a través de muestras inalteradas y resulta muy útil para observar y valorar el grado de perturbación o efectos ecológicos sobre un sitio en particular.

El estudio de la micromorfología del suelo se basa en el análisis de secciones delgadas preparadas a partir de muestras no alteradas del suelo y es un método que se utiliza actualmente para evaluar efectos que tienen diversos factores ecológicos (fauna, lluvia, fuego, cultivos, sequías.) sobre las propiedades del suelo (Vera *et al.*, 2007).

A través de la elaboración de secciones delgadas se puede evaluar la agregación y la porosidad tiene un suelo.

2.4.1 Porosidad

La porosidad total es la cantidad de espacio vacío (o poroso) ocupado por fluidos en el volumen total. Sin embargo, no es suficiente conocer la porosidad total de un

sustrato para describir la accesibilidad de los fluidos en el espacio poroso (Lemaire, 1995).

Los suelos presentan dos tipos de poros: internos y externos. La porosidad interna está influenciada por la naturaleza de las partículas, y estado de interconexión de los poros puede ser abierta o cerrada. Los poros abiertos o percolantes son los que tienen conexión con los poros externos. La porosidad efectiva es la porosidad percolante, abierta o interconectada, que es la que contribuye a la retención y movimiento del agua en el sustrato. La porosidad externa es la que se da por el empaquetamiento o acomodo de las partículas, la cual depende de la forma, tamaño y naturaleza de las mismas (Burés, 1997).

En el presente trabajo se evaluará el porcentaje de poros a través de análisis de imágenes de secciones delgadas. Con este análisis se puede observar y cuantificar el grado de compactación de la capa arable de cada clase de tierra.

2.5 VALLE DEL MEZQUITAL

2.5.1 Generalidades

El Valle del Mezquital está conformado por al menos cinco subregiones compuestas por las planicies de Ixmiquilpan, Tula, Actopan, Alfajayucan y Tasquillo. Este Valle se ubica dentro de los límites del estado de Hidalgo y se sitúa en lo alto de la meseta mexicana, a 60 km de la ciudad de México, con una altitud que varía de los 1700 a los 2100 metros sobre el nivel del mar.

El Valle del Mezquital es una de las regiones geográficas y culturales del estado de Hidalgo en México y está integrado por 27 municipios.

2.5.2 Recurso Suelo

Suelos en el Valle del Mezquital

Los suelos en el Valle del Mezquital son originados de materiales aluviales y coluviales transportados de los cerros aledaños, dando como resultado perfiles de profundidades cambiantes, en donde predominan los suelos delgados.

En este Valle se han reportado principalmente tres tipos de suelos: Vertisoles eutricos, Leptosoles rendzicos y molicos, Feozems haplicos y cálcicos de acuerdo con la Leyenda FAO versión 88 (Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 1995).

III. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1 OBJETIVOS

3.1.1 Objetivo General

Determinar las propiedades y el manejo de los suelos que usan agua residual sin tratar en el módulo de riego Tepatepec, en el Valle del Mezquital, estado de Hidalgo.

3.1.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar las diferentes clases de tierras a partir del conocimiento local en el área de estudio para caracterizar las propiedades y el manejo de los suelos irrigados con aguas residuales.
- b) Clasificar formalmente a los suelos de acuerdo con la Taxonomía de Suelos y la WRB.
- c) Realizar una caracterización de las aguas residuales que se emplean para regar a los suelos en la zona sobre sus contenidos de nitratos, fosfatos, materia orgánica, sodicidad y metales pesados.
- d) Evaluar el efecto del riego con aguas residuales sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos.

3.2 HIPÓTESIS

3.2.1 Hipótesis General

El uso de las aguas residuales en la agricultura en el módulo de riego Tepatepec tiene un efecto positivo sobre las clases de tierras que lo integran.

3.2.2 Hipótesis Específicas

- a) Los contenidos de materia orgánica, nitrógeno y fósforo de los suelos irrigados con aguas residuales presentan niveles óptimos en cuanto a su fertilidad.
- b) La calidad de las aguas residuales usadas en el módulo de riego Tepatepec son apropiadas para la agricultura.
- c) Las cantidades de sodio que poseen los suelos irrigados con agua residual sin tratar están dentro de los límites permisibles.
- d) Los metales pesados que se incorporan a los suelos a través del riego con agua residual en la zona de estudio se distribuyen en forma diferente con la profundidad de acuerdo con el tipo de suelo y su contenido es tolerable.
- e) La porosidad en los suelos varía en función de las distintas clases de tierras que se tienen en el módulo de riego Tepatepec y sus diámetros permiten el flujo del agua.

IV. MATERIALES Y METODOS

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1.1. Localización

La zona de estudio se localiza en el módulo de riego de Tepatepec en el Valle del Mezquital, estado de Hidalgo. Las coordenadas centrales son: $20^{\circ}14'93''.21$ N y $99^{\circ}06'48''.57$ W, con una altitud media de 1987 m. Esta zona está integrada por los municipios de Mixquiahuala de Juárez, Francisco I. Madero, y San Salvador, cubriendo una superficie de 5654 ha. Como se muestra en la Figura 4.1.

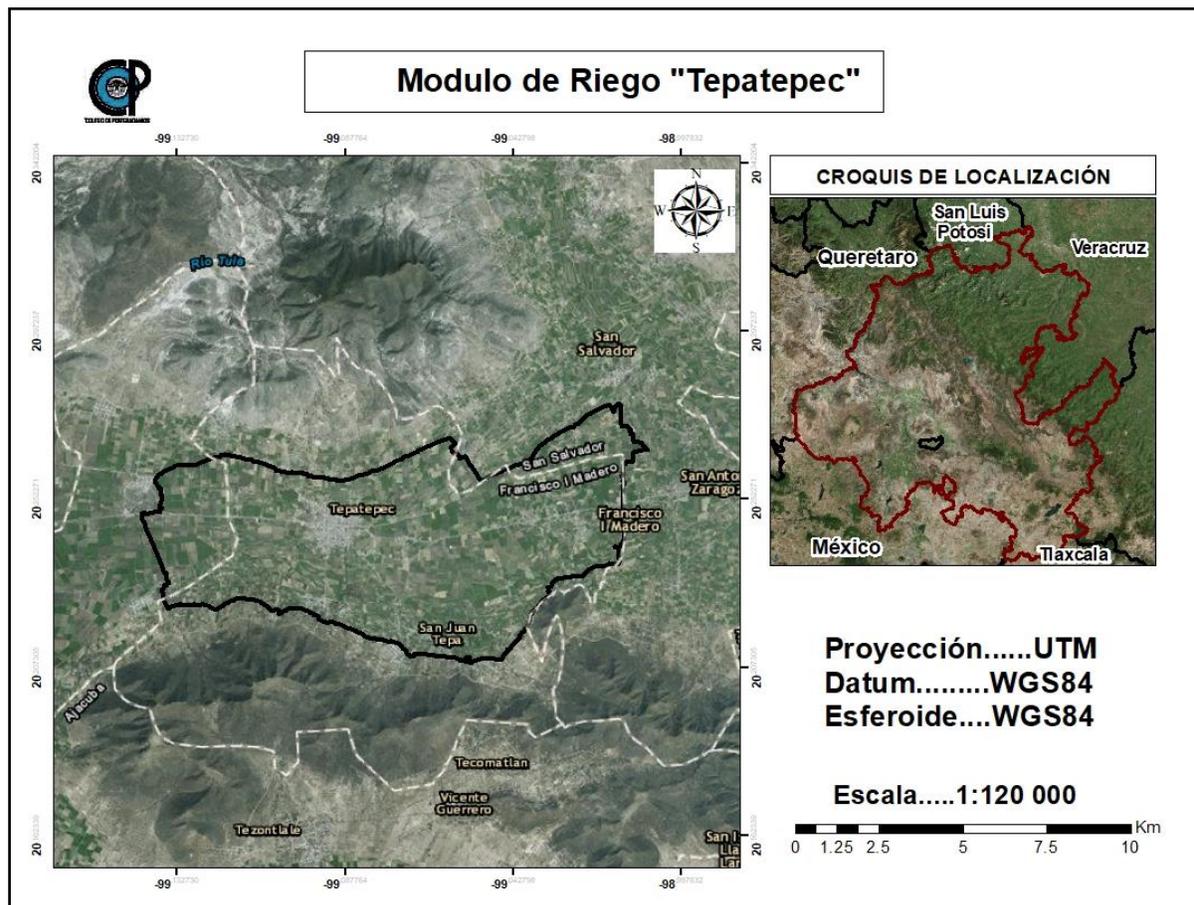


Figura 4.1. Ubicación Geográfica del Módulo de Riego "Tepatepec"

4.1.2 Clima

La zona de estudio de acuerdo con la CONABIO (2010), presenta un clima semiárido templado, en donde la temperatura media anual es de 16°C, la máxima ocurre en mayo con 25°C y la mínima en noviembre con 7°C. Esta temperatura y precipitación le confiere a la zona de estudio características particulares sobre todo para el establecimiento de diversos cultivos (Figura 4.2).

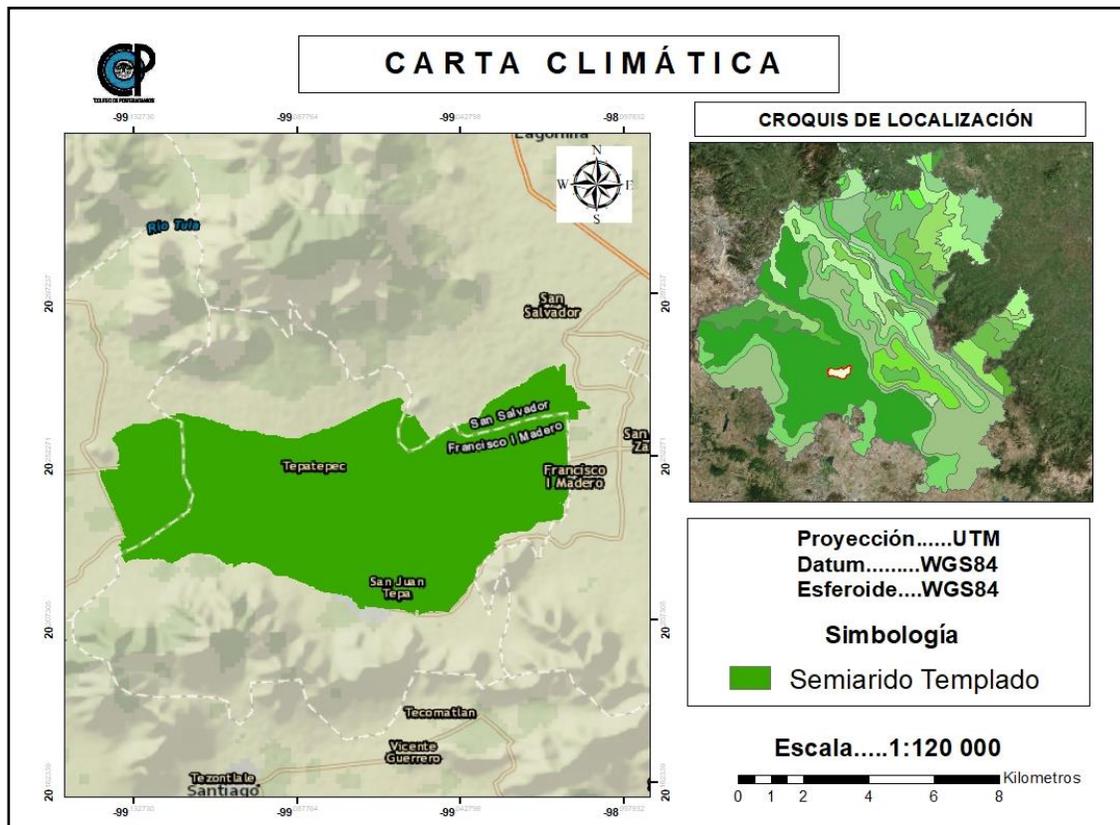


Figura 4.2. Carta Climática del Módulo de Riego Tepatepec en el estado de Hidalgo (CONABIO, 2010).

4.1.3 Precipitación

La precipitación anual que predomina en esta zona es de 400 mm a 500 mm en el municipio de Mixquiahuala de Juárez y parte de Francisco I. Madero; mientras que en San Salvador va de 500 mm a 600 mm, como se muestra en la Figura 4.3 (CONABIO, 2010)

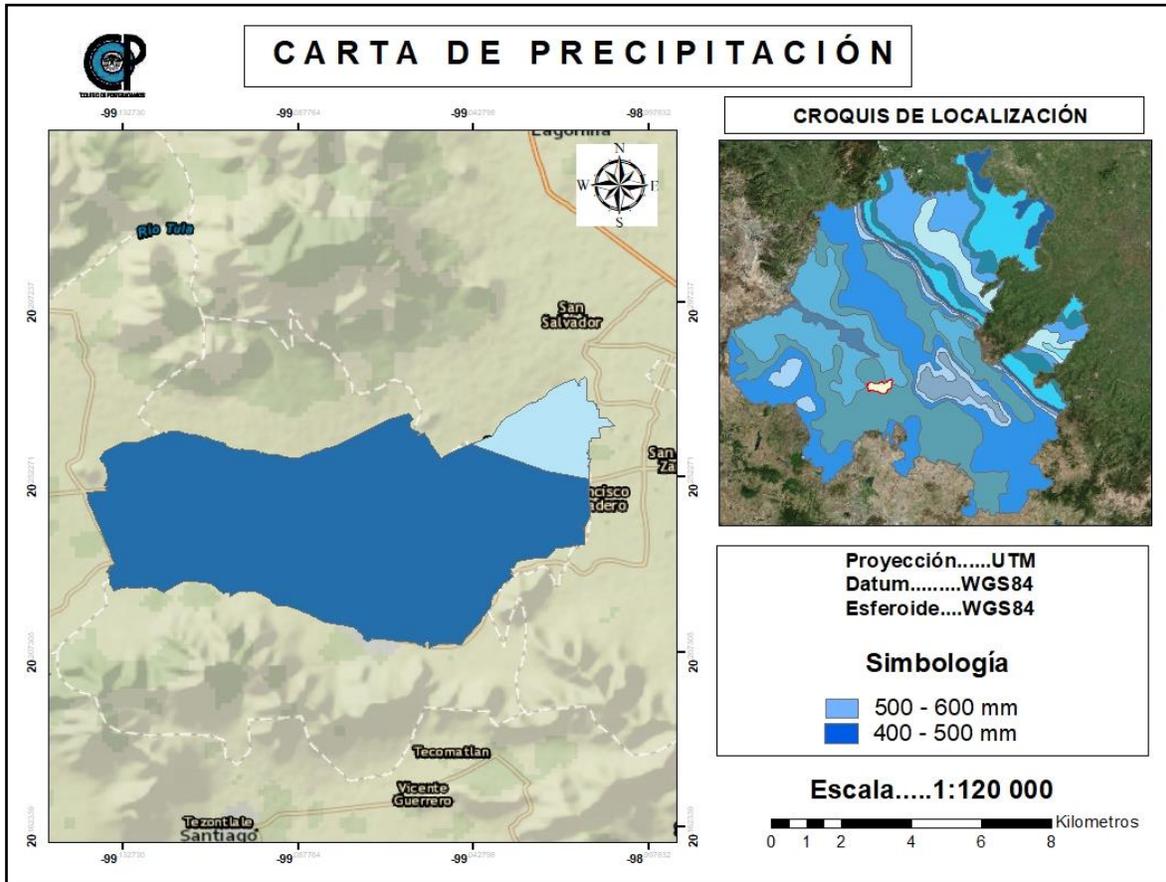


Figura 4.3. Precipitación del Módulo de Riego Tepatepec en el estado de Hidalgo (CONABIO, 2010).

4.1.4 Vegetación y uso de suelo

El Valle del Mezquital tiene un uso que está dominado por la agricultura de riego principalmente con maíz y alfalfa; sin embargo, aún se cuenta con agricultura de temporal y una parte con vegetación arbustiva nativa con mezquites, huizaches, pirules, sauces entre otros, en cantidades mínimas como se presenta en la Figura 4.4.

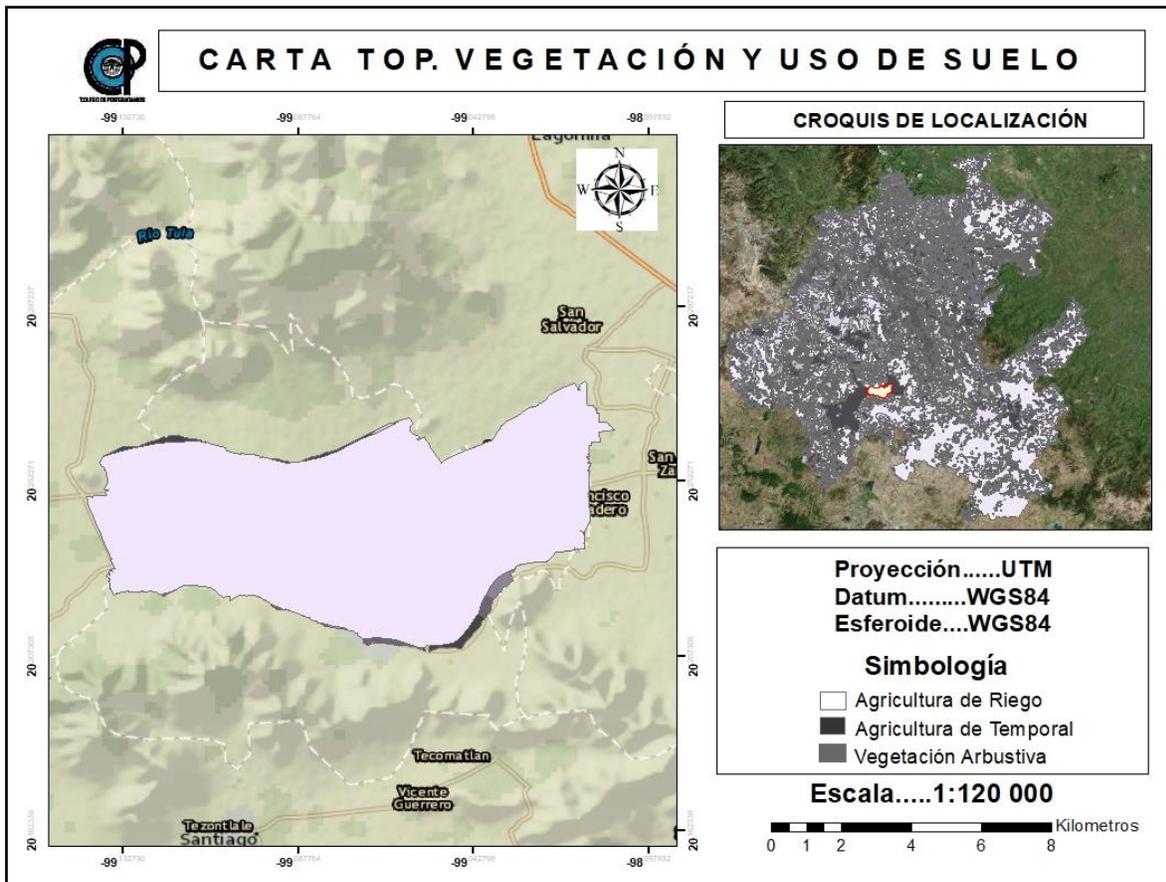


Figura 4.4 Tipo de vegetación y uso de suelo del Módulo de Riego Tepatepec en el estado de Hidalgo (CONABIO, 2010).

4.1.5 Edafología

De acuerdo con la CONABIO (2010), los suelos que dominan en la zona de estudio son vertisols; aunque también ocurren litosols y algunas rendzinas que son suelos pocos desarrollados y están situados sobre materiales calcáreos (Figura 4.5.).

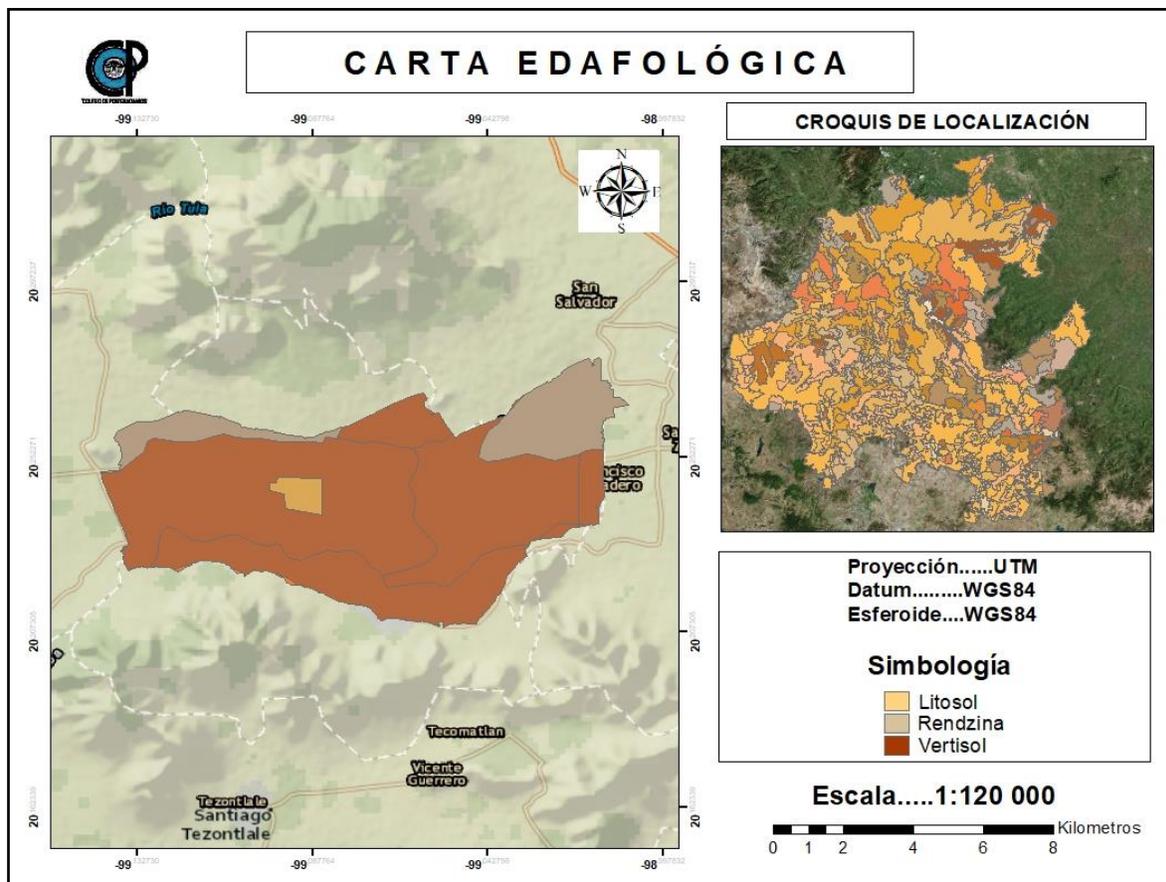


Figura 4.5 Edafología del Módulo de Riego Tepatepec en el estado de Hidalgo (CONABIO, 2010).

4.1.6 Riego y cultivos en el Valle del Mezquital

El método de riego que se emplea en esta zona es por inundación y la cantidad que se aplica varía de 1500 a 2200 mm por ciclo dependiendo del tipo de cultivo (alfalfa > maíz) y del tipo de suelo (Vertisoles > Litosoles).

Los principales cultivos en el área son alfalfa y maíz, los cuales cubren entre 60 y 80% de área total. En menor proporción se cultiva frijol, avena, trigo, cebada, y algunas hortalizas como chile, calabaza y tomate. La alfalfa es el cultivo dominante debido a la gran duración de su ciclo de desarrollo, fija nitrógeno, es tolerante al boro, y tiene un mercado asegurado por ser un alimento muy apreciado para ganado. A su vez el ganado produce leche útil para las zonas

urbanas de la Ciudad de México y del Valle Mezquital (Ramírez-Fuentes *et al.*, 2002; Downs *et al.*, 2000).

4.2 METODOLOGIA

El presente trabajo se llevó a cabo en siete etapas, las cuales se describen a continuación:

4.2.1 Estudio Etnoedafológico

La primera parte de la investigación consistió en la realización de un Estudio Etnoedafológico, el cual realizó a través de dos procesos: 1) Elaboración de un Mapa de Clases de Tierras a partir del conocimiento local, que se emplea como marco de referencia geográfico para identificar el uso y manejo de los suelos, y; 2) La realización de entrevistas a usuarios de las clases de tierras para generar información específica. Sobre esta segunda acción, de acuerdo con Williams y Ortiz (1981) el número de informantes está en función del aporte de conocimiento, es decir, cuando la información se vuelva repetitiva se concluirán con las entrevistas.

Cartografía de las Clases de Tierras

Para la elaboración del Mapa de Clases de Tierras se utilizó un plano con las parcelas de los productores, obtenido en la plataforma de SASPlanet. Con esta información se efectuó un recorrido de campo en compañía de una o dos personas que conocían el área. La ayuda del comisariado ejidal fue relevante en el presente estudio para identificar las características diferenciadoras y su reconocimiento para las distintas clases de tierras. Con esta información se fue dibujando a su vez en el plano parcelario los linderos de las diferentes clases de tierras.

Es necesario indicar que con la ayuda de los informantes fue posible determinar los sitios donde se presentaban los cambios de clases de tierras, y se cotejaron

los linderos, que, de acuerdo con la teoría del Levantamiento de Suelos, convierte a los mapas de clases de tierras en levantamientos detallados (Ortiz *et al.*, 2005).

Entrevistas a Productores

Una vez conocida la distribución de las clases de tierras en el área de estudio, dentro de cada clase se realizaron las entrevistas a productores para obtener información sobre el uso y manejo de las tierras irrigadas con aguas residuales. Tales entrevistas debían de cumplir tres condiciones, que sus respuestas fueran libres, espontáneas y no remuneradas.

4.2.2 Descripción de perfiles de suelos

En cada clase de tierra se describió un perfil modal de suelo de acuerdo con los productores y se describieron morfológicamente utilizando el manual de Cuanalo (1975). Posteriormente, se colectaron muestras inalteradas de suelo por horizonte o capa para determinar en el laboratorio sus propiedades físicas y químicas

4.2.3 Análisis de laboratorio

Las muestras de suelos fueron secadas a la sombra y tamizadas para obtener la fracción fina del suelo. Las propiedades edáficas fueron determinadas utilizando el manual de procedimientos para análisis de suelos de Van Reeuwijk (2002). Los análisis de las muestras de suelos se realizaron en el laboratorio de Génesis de Suelos del Colegio de Posgraduados. Las determinaciones se especifican en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Análisis realizados a las muestras de suelo.

Determinación	Método
pH	Relación agua suelo 2:1
CE	Extracto de la pasta de saturación
%CO	Walkley y Black
N-total	Semi-micro Kheldal

CIC	Acetato de amonio pH 7.0
Na y K intercambiables	Flamometría
Cay Mg intercambiables	Absorción atómica
P	Olsen
Color	Carta de Colores Munsell
Textura	Pipeta americana
Da	Terrón parafinado
CaCO ₃	Horton and Newson

4.2.4 Análisis de Aguas Residuales

Con el objetivo de establecer cómo varían las concentraciones totales iónicas en las aguas residuales, se colectaron muestras de aguas directamente en las tomas parcelarias de los terrenos donde se hicieron los pozos pedológicos. Las muestras se colectaron en tres tiempos, la primera a las 6:00 am, la segunda a las 12:00 pm y la última a las 6:00 pm. Al final se realizó una muestra compuesta, la cual se sometió posteriormente al análisis de laboratorio.

Los parámetros que se utilizaron para mediar la calidad del agua residual fueron: pH, CE, Ca⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, CO₃⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, RSE y RSC utilizando diferentes procedimientos que se reportan el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2 Métodos analíticos utilizados para caracterizar las aguas residuales.

DETERMINACIÓN	MÉTODO
pH	Potenciómetro marca Beckman
Conductividad eléctrica	Conductímetro puente de Wheatstone con celdas de vidrio de rango 1-5
Residuo seco evaporado	Gravimetría utilizando estufa Hot-Plate modelo Type 2200 Thermoline
Residuo seco calcinado	Gravimetría utilizando mufla Lindberg
Calcio más Magnesio	Volumétrico titulación con 0.01 N
Calcio	Volumétrico titulación con EDTA 0.01 N

Sodio y potasio	Flamometría con flamómetro 648 IL $\lambda=589$ nm utilizando soluciones Standard 140 meq l ⁻¹ para Na y 5.0 meq l ⁻¹ para K
Carbonatos y Bicarbonatos	Volumétrico titulación con ácido sulfúrico 0.01 N, indicador fenolftaleína
Cloruros	Titulación con nitrato de plata 0.01 N. Indicador cromato de potasio al 5%
Sulfatos	Turbidimetría: Espectrofotómetro 35 Perkin Elmer $\lambda=420$ nm

Índice de Relación de Adsorción de Sodio (RAS)

El índice de relación de adsorción de sodio se deriva de las concentraciones de los cationes en estado soluble e intercambiable, específicamente en el caso del calcio y sodio (Suárez *et al.*, 1981).

Este índice se utiliza para medir la solidificación que presenta el agua de riego, debido a que existe una relación entre el porcentaje del sodio intercambiable (PSI) de un suelo. Se calcula con la formula siguiente:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

Dónde:

Na⁺. Es la concentración de los iones de sodio en el agua, expresada en meq L⁻¹

Ca²⁺. Es la concentración de los iones de calcio en el agua, expresada en meq L⁻¹

Mg²⁺. Es la concentración de los iones de magnesio en el agua, expresada en meq L⁻¹

Estimación del Porcentaje de Sodio Intercambiable

El RAS se utilizar para estimar el por ciento de sodio intercambiable en el suelo y se determina aplicando la siguiente ecuación.

$$PSI = \frac{100(-0.0126 + 0.01475RAS)}{1 + (-0.0126 + 0.01475RAS)}$$

Cálculo de Salinidad Efectiva

Este cálculo se utiliza para determinar el contenido de carbonatos y bicarbonatos y se realiza de la siguiente manera:

A) $Ca > (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$, entonces:

$$SE = \text{suma de cationes} - (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$$

B) $Ca < (CO_3 + HCO_3 + SO_4)$; pero $Ca > (CO_3 + HCO_3)$, entonces

$$SE = \text{suma de cationes} - Ca$$

C) $Ca < (CO_3 + HCO_3)$; pero $(Ca + Mg) > (CO_3 + HCO_3)$, entonces

$$SE = \text{suma de cationes} - (CO_3 + HCO_3)$$

D) $(Ca + Mg) < (CO_3 + HCO_3)$; entonces

$$SE = \text{Suma de cationes} - (Ca + Mg)$$

4.2.5 Determinación de metales pesados en suelo

En un tubo de ensaye se colocó 0.5 g de suelo y se añadió 1 ml de peróxido de hidrógeno al 30% y 4 ml de una mezcla binaria de ácido perclórico ($HClO_4$) y ácido nítrico (HNO_3) en proporción 1:4. Todas las muestras se predigestaron durante 12 horas. Transcurrido el tiempo se colocó en un digestor $80^\circ C$ hasta que las muestras se tornaron transparentes. El extracto se colocó en un matraz aforado de 50 ml, se añadió agua desionizada hasta aforar y se filtró con papel Whatman No. 42. Posteriormente, se realizaron las lecturas de As, Cd, Cr, Ni, Pb y Zn en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer.

4.2.6 Agregación del Suelo

La agregación y la estabilidad de los suelos se evaluaron únicamente en la capa arable (30 cm) de cada clase de tierra, y se determinó en húmedo y en seco.

Estabilidad de Agregados en Seco

La distribución de agregados en seco se cuantificó por el método propuesto por Savinov (1936). La evaluación de estabilidad de agregados es igual a la relación entre el peso de los agregados de tamaño óptimo que van de 0.25 a 4.75 mm y el peso total de la muestra. Un mayor valor del estado estructural del suelo corresponde a una mayor capacidad de estructuración.

Estabilidad de Agregados en Húmedo

La estabilidad de agregados en húmedo se evaluó por el método Yoder modificado por Kemper y Rosenau (1986).

Macro y Micro Agregados

Los macro y micro agregados explican el comportamiento general del suelo a la acción de una actividad de manejo. Estos se obtuvieron para la condición en seco y en húmedo a partir de la distribución y estabilidad de agregados. La suma de los agregados >1 mm se consideraron macroagregados; mientras que la suma de los agregados <1 mm se denominaron microagregados (Cotler y Ortega-Larrocea, 2006).

4.2.7 Secciones Delgadas

El estudio de los suelos y sedimentos a nivel microscópico empleando secciones delgadas es una técnica complementaria para los estudios pedológicos. Una sola muestra es apropiada cuando la descripción micromorfológica necesita proporcionar mayor información en la descripción de campo y en los análisis de laboratorio.

Las secciones delgadas de suelos generalmente son utilizadas para evaluar la iluviación arcillosa, intemperismo, expansión y contracción e hidromorfismo. En las investigaciones sedimentológicas pequeñas irregularidades de arena dentro de una acumulación arcillosa puede indicar pequeños cambios de ambiente. Este proceso no es fácilmente reconocido en la descripción de campo ni en un análisis de textura, pero si en una sección delgada (Figura 4.6).

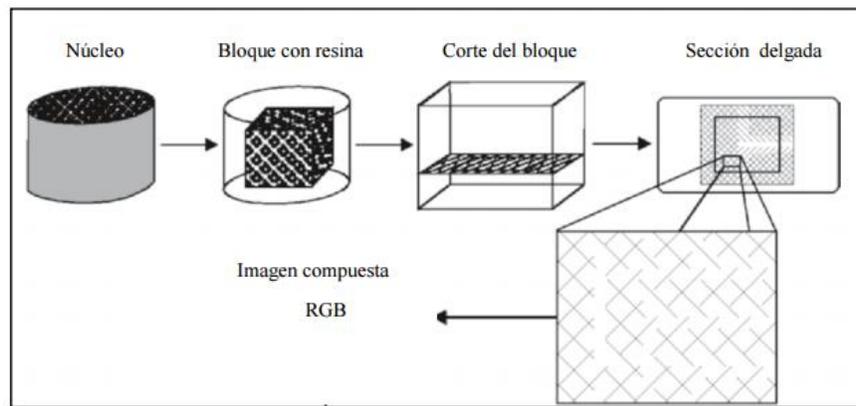


Figura 4.6. Producción de secciones delgadas y su visualización (Frank y Mills 2007).

Las secciones delgadas ($5.5 \times 7 \times 30 \mu\text{m}$) de las muestras inalteradas se elaboraron de acuerdo con Murphy (1985). El método consiste en impregnar los bloques de suelos con resina poliéster insaturada y monómero estireno en una relación 7:3. Luego, las muestras se dejaron en una etapa de gelación durante un mes y posteriormente, bajo la sombra para acelerar la polimerización de la resina. Los bloques endurecidos de suelos fueron cortados con un disco de punta de diamante y los cortes son pulidos utilizando diferentes abrasivos.

Las secciones delgadas se describieron utilizando los términos propuestos por Bullock *et al.* (1985); específicamente describieron la porosidad y los tipos de agregados.

Para el análisis de imágenes, se tomaron una serie de fotografiadas secuenciales de toda la sección delgada con el objetivo 2x (215 fotografías). La cámara digital está montada a un microscopio petrográfico Olympus BX51. Posteriormente, las imágenes fueron tratadas con el software AutoCad 2018, ArcMap 10.4 e Imagefiji para establecer la precisión y la corrección geométrica de cada imagen. Con el procesamiento de imágenes se logró cuantificar la porosidad total de la sección delgada e identificar los tipos de agregados.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 CLASES DE TIERRAS DEL MÓDULO DE RIEGO “TEPATEPEC”

5.1.1 Información General

Las clases de tierra reconocidas por los productores en el área de estudio se identificaron por medio de recorridos de campo parcela por parcela con las autoridades del módulo de riego “Tepatepec”. Además, para obtener información sobre el uso y manejo tanto de las tierras como de las aguas residuales, se efectuaron entrevistas a agricultores poseedores de las clases encontradas, así como a vecinos de los municipios de Mixquiahuala de Juárez, Francisco I. Madero y San Salvador.

Las autoridades se rigen bajo la normativa de los estatutos establecidos en el módulo de riego. Cuentan con un Comité directivo, cuyos integrantes son el Presidente MVZ. Marcelino Rubén Ángeles Santiago, el Secretario Prof. Luis Cerón Hernández y el Tesorero C. Lino Roberto Monroy Artega quienes se encargan de presidir las reuniones de consejo que les permite tener conocimiento entre otras cosas de las diferentes clases de tierras y sus linderos.

En los recorridos de campo se pidió que indicaran las clases de tierras que son irrigadas con agua residual, así como, una breve descripción de sus características y la forma cómo se diferencian de sus vecinas. La clasificación se basa en la profundidad y la cantidad de piedras presentes en los suelos. Esta información permitió diferenciar a tres clases de tierras.

La nomenclatura de las clases reconocidas fue la siguiente:

- a) Tierra Delgada con Piedra.
- b) Tierra Delgada sin Piedra.
- c) Tierra Gruesa.

En los siguientes párrafos se describen las características más relevantes, transcribiendo las opiniones de los productores, de las diferentes clases de tierra y se ilustran con una imagen del paisaje.

5.1.2 Tierra Delgada con Piedra

La clase de Tierra Delgada con Piedra se caracteriza por su profundidad media y por el contenido de piedras que pueden llegar a representar hasta 25% del volumen de la capa arable. En esta tierra se siembra maíz, alfalfa, frijol, chile y cultivos de invierno. Tiene la característica que retiene poca humedad. Los productores hicieron mención que la baja productividad de los suelos es por el agua con la que se irriga ya que proviene del canal Elba. Este canal conduce principalmente agua blanca y se caracteriza por captar el agua de lluvia de la presa Endho y los excedentes del canal Requena. En esta clase de tierra se ha implementado la plantación de legumbres y debido a que los productores comentaron que los rendimientos de maíz eran variables se determinó estudiar dos pozos pedológicos, uno con bajos y otro con altos rendimientos, para evaluar sus características físicas y químicas.

Tierra Delgada Con Piedra y Bajo Rendimiento

El suelo dentro de esta condición presenta una pedregosidad uniforme en todo el perfil, lo que facilita las labores de labranza para legumbres, y las dificulta para cultivos de raíces profundas. Los rendimientos de maíz en esta clase de tierra varían de ocho a diez toneladas por ha (Figura 5.1).



Figura 5.1. Tierra Delgada con Piedra y Bajo Rendimiento

Tierra Delgada Con Piedra y Alto Rendimiento

En comparación con el perfil anterior (bajo rendimiento), la piedra tiene presencia únicamente en la superficie del suelo; se observa que la retención de humedad aumenta y esto complica las labores de labranza para el cultivo de legumbres, pero favorece a las gramíneas principalmente al maíz. Se pueden alcanzar rendimientos de diez a doce toneladas de grano de maíz por hectárea (Figura 5.2).



Figura 5.2 Tierra Delgada con Piedra y Alto Rendimiento.

5.1.3 Tierra Delgada Sin Piedra

Esta clase de tierra presenta poca pedregosidad y únicamente en la parte superficial con 5% del volumen. Al momento de cavar el pozo pedológico se observó que se encontraban libres de piedras los horizontes del subsuelo. Otro dato importante es que se encuentran ubicadas en canteros (nombre local de las terrazas). Su fuente de irrigación es la misma que las tierras delgadas con piedra (canal Elba). Los cultivos que prevalecen en esta clase son maíz, alfalfa, frijol, calabaza y chile. Debido a que los rendimientos de grano de maíz fueron también variables se optó de igual forma en cavar dos pozos pedológicos, en donde se observan rendimientos contrastantes de maíz.

Tierra Delgada Sin Piedra y Bajo Rendimiento

El argumento principal que daban los productores referentes a esta clase de tierra, es que son propicios para la urbanización debido a la cercanía que se tiene con la cabecera municipal de Francisco I. Madero. En cuanto a la agricultura, lo que persiste es la producción de grano de maíz, donde los rendimientos máximos alcanzan hasta 11 t ha. También se han incentivado cultivos como alfalfa y cultivos de invierno para forraje, tales como avena, cebada o trigo (Figura 5.3).



Figura 5.3 Tierra Delgada Sin Piedra y Bajo Rendimiento.

Tierra delgada Sin Piedra y Alto Rendimiento

Las tierras más rendidoras dentro de las delgadas sin piedra son utilizadas para la producción de grano de maíz, donde los rendimientos pueden llegar a ser hasta de trece toneladas por hectárea, los cultivos de calabaza y frijol también están presentes (Figura 5.4).



Figura 5.4 Tierra Delgada Sin Piedra y Alto Rendimiento.

5.1.4 Tierras Gruesas

Las tierras gruesas (Figura 5.5) son las dominantes en cuanto a superficie en el módulo de riego y las de mejor calidad para la agricultura. Los rendimientos en esta clase de tierra son muy homogéneos (de 15 a 17 toneladas por hectárea de grano de maíz). Otros cultivos importantes son alfalfa, col, cultivos invernales y el corte rollos de césped para jardinería. Los productores atribuyen que la fertilidad de estos suelos depende de la cantidad de materia orgánica que tiene el agua residual que se utiliza proveniente del canal Requena. Este canal se caracteriza por recibir de manera directa las descargas de la ciudad de México. Dada la homogeneidad de esta clase de tierras únicamente se excavó un perfil de suelo.



Figura 5.5 Tierra Gruesa

5.2 CARTOGRAFÍA DE CLASES DE TIERRAS

La cartografía de las clases de tierras se efectuó a partir de la identificación realizada por los usuarios e integrantes del Consejo directivo del módulo de riego “Tepatepec” y utilizando como mapa base a una imagen de la plataforma de SASPlanet con fecha 2015 y con una resolución de 80 centímetros por pixel.

En esta imagen (Figura 5.6), se muestra en primer término los límites del módulo de riego “Tepatepec”, y las líneas punteadas de color blanco son los límites municipales (Mixquiahuala de Juárez, Francisco I. Madero y San Salvador).

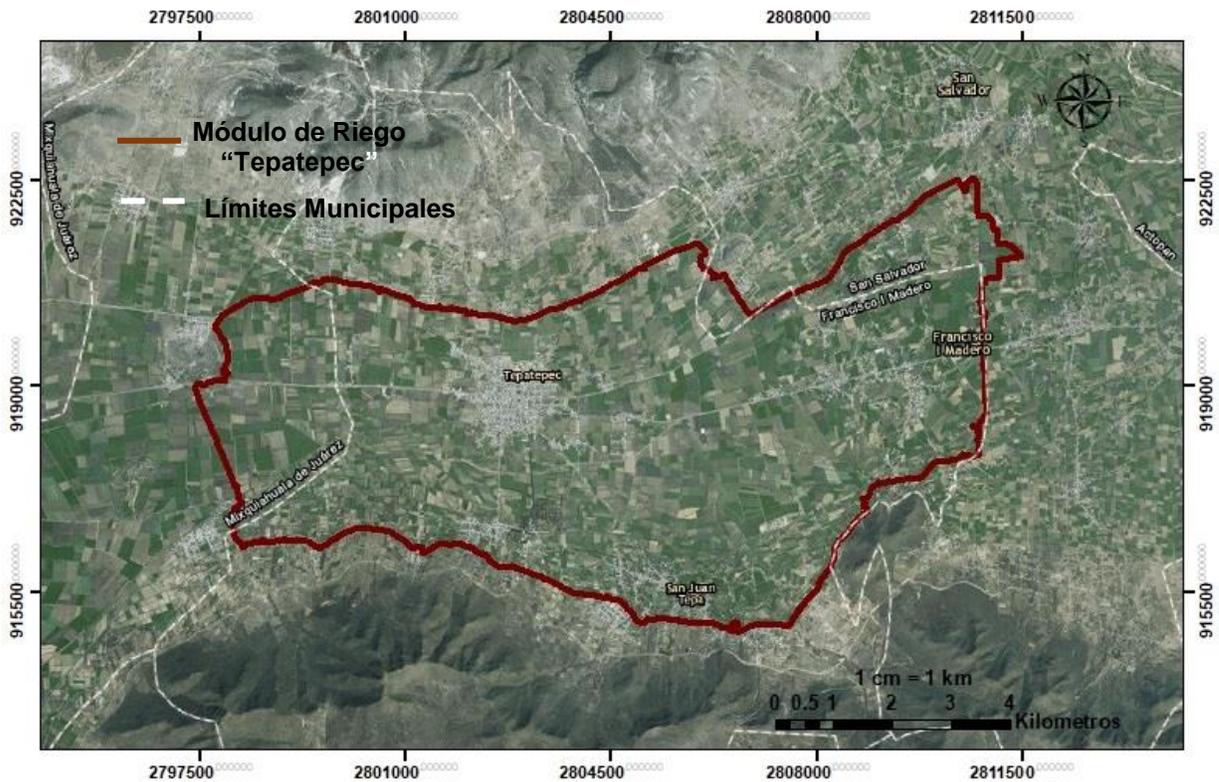


Figura 5.6. Módulo de Riego “Tepatepec”.

Los linderos de las clases de tierras identificadas por los productores se trazaron durante los recorridos de campo sobre una copia impresa de la imagen de satélite (Figura 5.6). Posteriormente, los linderos fueron digitalizados y se obtuvieron los polígonos de las diferentes clases (Figura 5.7).

A continuación, sobre el mapa de clases de tierras se cuantificó su superficie, cuyo orden de dominancia fue Tierra Gruesa, Tierra delgada con piedra y tierra delgada sin piedra como se muestra en el Cuadro 5.1.

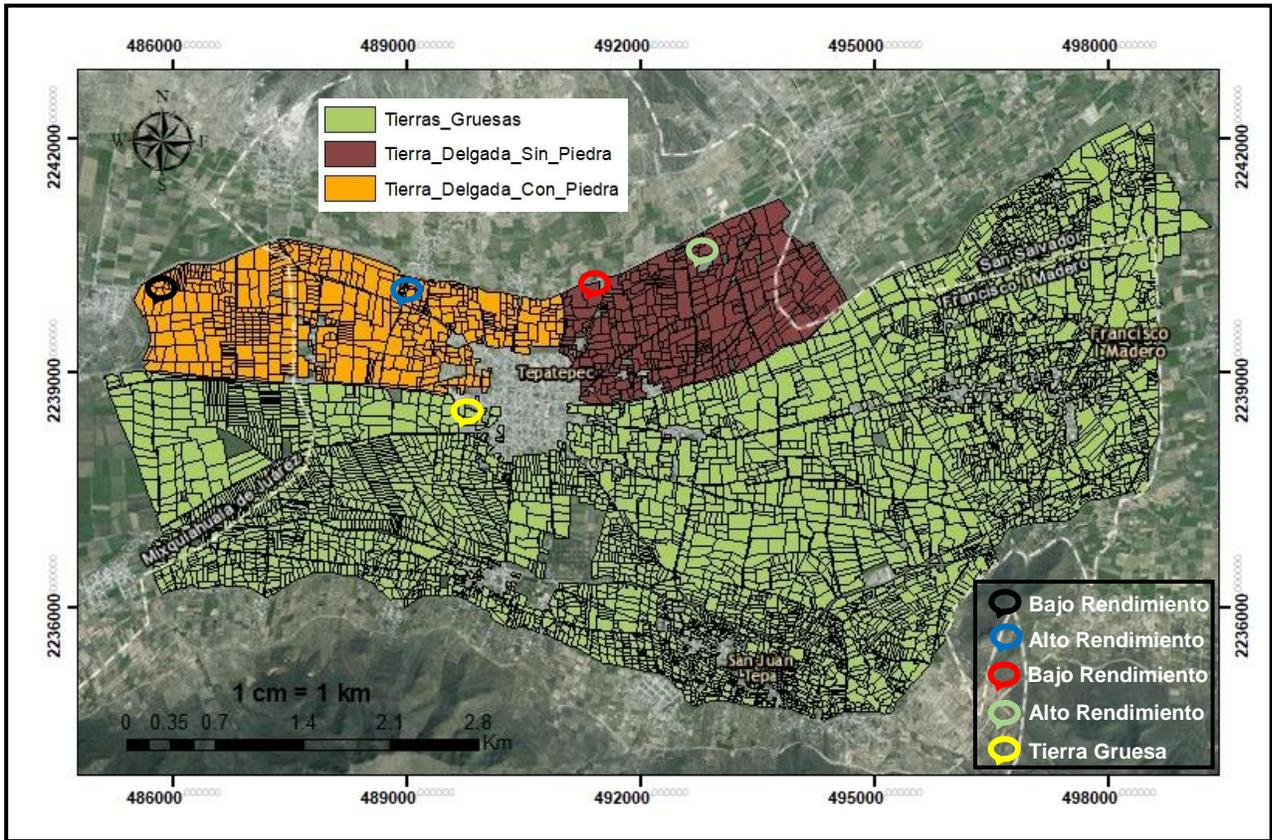


Figura 5.7 Clases de tierra en el Módulo de Riego “Tepatepec”.

Cuadro 5.1. Clases de Tierras en el Módulo de Riego “Tepatepec”

Clase de Tierra	Superficie (ha)	Extensión (%)
<i>Tierra gruesa</i>	4393.89	77.71
<i>Tierra delgada con piedra</i>	715.89	12.66
<i>Tierra delgada sin piedra</i>	544.96	9.63
Total	5654.74	100

5.3 CLASIFICACIÓN DE SUELOS

En las Clases de tierras Delgada con piedra y sin piedra se describieron dos perfiles en cada una de ellas, mientras que en la clase de tierra Gruesa únicamente se estudió uno, para un total de cinco perfiles (Figura 5.8). (En el Anexo I, se reportan tanto las descripciones de los perfiles, como los datos de los análisis de laboratorio, de todas las clases de Tierras). Con ambos datos se realizó la clasificación formal para los suelos irrigados con agua residual.

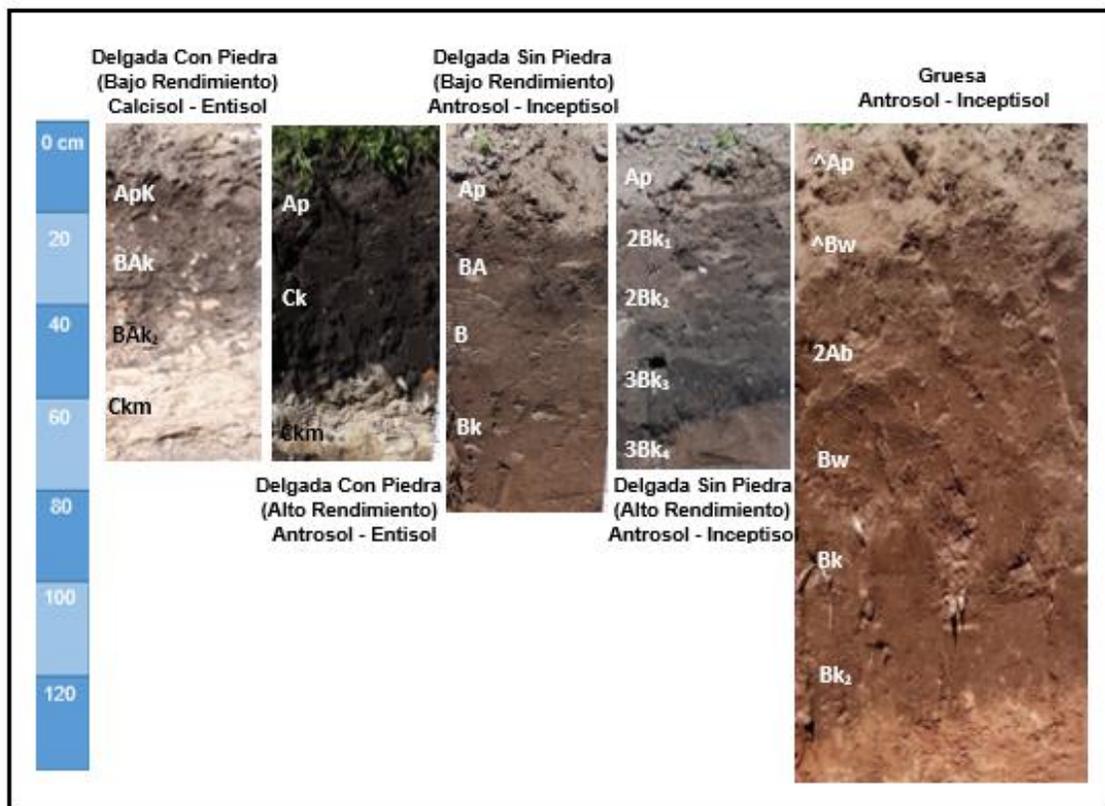


Figura 5.8 Perfiles de las Clases de Tierras.

5.3.1 Sistema de la Taxonomía de Suelos

De acuerdo con las Claves de la Taxonomía de Suelos (2014) se requiere determinar los horizontes de diagnóstico, epipedones y horizontes subsuperficiales y las propiedades de diagnóstico, para su correcta clasificación.

El Epipedón Ocrico es el horizonte que domina en todos los tipos de suelos, este epipedón se caracteriza por presentar colores claros, bajos contenidos de materia orgánica, son delgados, con consistencias duras. Tienen una baja fertilidad y limitantes para la producción de cultivos.

Con respecto a las propiedades de diagnóstico fue necesario establecer los regímenes de humedad y temperatura; para ello, se utilizaron los datos de la estación meteorológica con clave 13060 y denominada Actopan. La localización geográfica de esta estación es una latitud norte de 20.26 grados y una longitud oeste de -98.95 grados y tiene una elevación de 1993 m. Los datos analizados comprenden el periodo de 1951–2010 y corresponden a sus normales históricas. Con el uso del Programa de Simulación Newhall se encontró que el Régimen de Temperatura del suelo es Isotérmico y el Régimen de Humedad del Suelo es Ústico.

Los regímenes usticos se caracteriza por presentar un periodo de lluvias bien definido durante cinco meses en el verano, por lo que se puede obtener un cultivo anual (Soil Taxonomy, 1999). En el caso del régimen de temperatura isotérmino, indica que la zona es caliente, con temperaturas superiores a 30°C.

Por la presencia o ausencia de horizontes de diagnóstico, los suelos del módulo de riego “Tepatepec” se clasificaron como Inceptisols y Entisols. Los primeros ocupan el 87.34% de la zona, son suelos débilmente desarrollados con presencia de un horizonte cámbico, cálcico o un fragipán. Los Entisols representan el 12.66% y se caracterizan por ser suelos de reciente formación y su desarrollo de horizontes de diagnóstico es casi nulo (Taxonomía de Suelos, 2014).

En Inceptisols o Ustepts, que son Inceptisols con un régimen de humedad ústico, y a nivel de Grandes grupos, los procesos pedogenéticos que se presentan es el desarrollo de la estructura, que define al horizonte cámbico, la iluviación de carbonato de calcio (horizonte cálcico) o bien son los más simples (háplicos).

De acuerdo a la Soil Taxonomy (1999) los Calciustepts tienen un horizonte cálcico o petrocálcico, son calcáreos y tienen un tamaño de partícula de arena donde la precipitación ha sido insuficiente para eliminar los carbonatos de los horizontes superiores, mientras que los Ustortents son definidos como suelos con un rango

de pendiente pronunciado y presentan un contacto lítico y generalmente son utilizados para el pastoreo y cuencas hidrográficas.

Los Subórdenes Orthents, son Entisols que no tienen horizontes desarrollados, debido a que están sobre pendientes muy pronunciadas o prácticamente sobre la roca donde los procesos erosivos limitan la formación del suelo, por lo que siempre son delgados (Taxonomía de Suelos, 2014). Estos suelos están presentes en las Tierras Delgadas con Piedra de Alto y Bajo Rendimiento.

Los Grandes Grupos son los Ustorthents (Entisols con régimen de humedad ústico sin desarrollo de horizontes), Haplustents (Entisols con régimen de humedad Ústico sin horizontes y sin evolución) y Calciustents (Inceptisols con régimen de humedad Ústico y con carbonatos de calcio).

A nivel de Subgrupos se encontró que, la clase de Tierra Delgada con Piedra de alto y bajo rendimiento se clasifican como: Lithic Ustortents, es decir, son suelos someros; mientras que la Tierra Delgada Sin Piedra de alto y bajo rendimiento se clasificaron como: Udic Calciustents (acumulación de carbonatos de calcio) y la Tierra Gruesa se clasificó como: Udic Haplustepts, como se reporta en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Clasificación de suelos que integran a las clases de tierra del módulo de riego “Tepatepec” con la Taxonomía de Suelos.

Clase de Tierra	Profundidad (cm)	Epipedon	Orden	Suborden	Gran grupo	Subgrupo
Delgada c/p BR	50	Ocrico	Entisol	Orthents	Ustorthents	Lithic Ustortents
Delgada c/p AR	55	Ocrico	Entisol	Orthents	Ustorthents	Lithic Ustortents
Delgada s/p BR	70	Ocrico	Inceptisol	Ustepts	Calciustepts	Udic Calciustepts
Delgada s/p AR	80	Ocrico	Inceptisol	Ustepts	Calciustepts	Udic Calciustepts
Gruesas	120	Ocrico	Inceptisol	Ustepts	Haplustepts	Udic Haplustepts

**c/p= con piedra, **s/p= sin piedra, ** BR= Bajo Rendimiento, ** AR= Alto Rendimiento

A partir del Cuadro 5.2, es posible indicar que los suelos que se tienen en el módulo de Tepatepec son suelos poco desarrollados, de recientes a incipientes. De acuerdo con Gutiérrez-Castorena *et al.*, (2015) los regímenes de humedad pueden cambiar por prácticas de manejo en los distritos de riego de Aridic a Udic. En la presente investigación el cambio fue de Ustic a Udic por el uso prolongado y continuo por las aguas residuales. En condiciones naturales estos suelos no eran ideales para la producción de alimentos, pero con la incorporación de actividades agrícolas, irrigación y fertilizantes se hicieron productivos tal como lo señala Brady y Weil (2012).

5.3.2 Clasificación de Suelos con el Sistema de la Base Referencial de Suelos (WRB)

Con base en los resultados de la descripción de campo y los análisis de laboratorio se realizó también la clasificación con en IUSS Grupo de Trabajo de la WRB (2014). Con base en este sistema en la zona de estudio existen tres grupos de referencia, cuatro Calificadores Grupo I y cinco Calificadores Grupo II.

Los suelos dominantes son los Anthrosols, que son suelos condicionados por acciones humanas, siempre provocadas por el riego y las incorporaciones de residuos de cosecha y un aprovechamiento del suelo durante largo tiempo (WRB, 2014). Las clases de tierras que se presentan en este grupo de referencia son: Tierras Gruesas, Tierras delgadas con piedra y alto rendimiento, las Tierras delgadas sin piedra de alto y bajo rendimientos.

Las Tierras delgadas con piedra de bajo rendimiento se ubican dentro de la unidad llamada Calcisol, que son suelos con acumulaciones de Carbonatos de calcio secundarios.

A nivel de Calificadores Grupo I se tienen tres: Háplico (no se parece a ningún otro suelo), Irrágrico (que presenta un horizonte irrágrico que consiste en la irrigación constante del suelo) y Térrico (presencia de un horizonte térrico) y; a nivel de Calificadores Grupo II se definen dos: Calcárico (presencia de material calcárico) y Eútrico (más de 50% de saturación de bases) (Cuadro 5.3).

Cuadro 5.3. Clasificación con la Base Referencial de Suelos de las clases de tierra en el módulo de riego “Tepatepec”.

Clase de Tierra	Profundidad (cm)	Material parental	Unidad	Calificador Grupo I	Calificador Grupo II
Delgada c/p BR	50	Calizas	Calcisol	Háplico	Calcarico
Delgada c/p AR	55	Calizas	Antrosol	Irragrico	Calcarico
Delgada s/p BR	70	Calizas	Antrosol	Irragrico	Eutrico
Delgada s/p AR	80	Calizas	Antrosol	Irragrico	Eutrico
Gruesas	120	Basalto	Antrosol	Irragrico	Eutrico

****c/p= con piedra, **s/p= sin piedra, ** BR= Bajo Rendimiento, ** AR= Alto Rendimiento**

Es preciso mencionar que los antecedentes sobre la clasificación de suelos en esta zona del Valle del Mezquital indican que corresponden a Vertisoles en su totalidad como lo da a conocer INEGI en su carta edafológica del 2010. Al concluir esta etapa del estudio esta información ha quedado descartada, ya que los resultados obtenidos ya fueron analizados y no corresponden a los mencionados por INEGI.

Al comparar los dos sistemas de clasificación (Claves Taxonomía y WRB 2014) se observa que la Taxonomía generaliza la información y los clasifica como suelos incipientes y de poco desarrollo lo que no permite clasificarlos de manera específica; mientras que la WRB los asigna con calificadores principales y secundarios donde las actividades agrícolas ya son expresadas (Ramos *et al.*, 2000), siendo la irrigación constante el factor dominante.

Los Anthrosols comprenden suelos que han sido modificados profundamente por actividades humanas, tales como la adición de materia orgánica o mineral, el riego y la labranza (WRB 2014).

En otros distritos de riego como el insurgente también reportaron la formación de Anthrosols teniendo un horizonte térrico y hortico debido la incorporación de sedimentos tal como lo reporta Reséndiz-Paz (2012).

5.4 CALIDAD DE LAS CLASES DE TIERRAS

Para conocer la calidad y el manejo de las clases de tierras que son irrigadas en el módulo de riego Tepatepec se realizaron entrevistas con productores que trabajaban en ellas, a través de pláticas directamente en el terreno. Otra parte de la información se recopiló en las oficinas del módulo, aprovechando que los productores se reúnen cada segundo miércoles del mes. De acuerdo con los resultados de estas investigaciones hay tres indicadores de calidad en las clases de tierras que determinan los rendimientos de grano de maíz:

- a) Irrigación;
- b) Fertilidad y;
- c) Labranza

El primer aspecto considerado fueron los riegos que son aplicados desde la siembra hasta la cosecha. De acuerdo con los productores, las tierras Delgadas con piedra retienen poca humedad (6 riegos por ciclo de maíz) en comparación con las tierras Gruesas (4 riegos por ciclo de maíz). Además, indican que las hortalizas, el frijol, el chile y la calabaza son cultivos que se han adaptado muy bien a la irrigación con aguas residuales. Sin embargo, en el caso el maíz, este siempre es irrigados con agua blanca (así la llaman los productores). Al momento de clasificarlas por calidad estas tierras son las que menos rinden.

Las tierras Delgadas sin piedra también son irrigadas con agua blanca (Canal Elba) y retienen poca humedad, aunque en comparación con los suelos que tienen piedra, son mejores ya que al no tener presencia de piedras se pueden establecer cultivos como la alfalfa. Los productores indican que cuando se sega la alfalfa, la

ausencia de piedras hace que o se dañen las cuchillas. Además, el cultivo principal es el maíz para grano, y se realizan cinco riegos, desde la siembra hasta la cosecha uno cada mes. Los productores opinan que estas tierras son de mediana calidad.

En lo que respecta a la fertilidad del suelo, los productores mencionan que las Tierras Gruesas son las mejores, ya que se han logrado rendimientos de grano de maíz de hasta 17 toneladas por hectárea. Los productores atribuyen su fertilidad a que son irrigadas con el canal Requena, que es abastecido por las descargas directas de la ciudad de México. Esta información fue analizada en los estudios de materia orgánica, nitrógeno y fosforo que se hicieron en cada una de las clases. Los resultados se muestran en el Cuadro 5.4.

Cuadro 5.4. Análisis de Fertilidad de las Clases de Tierra.

Clase de Tierra	Profundidad	Materia Orgánica	Nitrógeno (%)	Fosforo (ppm)
Tierra Delgada con piedra y Bajo Rendimiento	0-15	4.15	0.26	19.02
	15-25	4.55	0.20	2.81
	25-40	4.68	0.25	16.47
Tierra Delgada con piedra y Alto Rendimiento	0-15	2.70	0.17	18.42
	15-50	3.36	0.14	20.14
Tierra Delgada sin piedra y Bajo Rendimiento	0-20	4.94	0.45	5.51
	20-40	7.85	0.37	7.89
	40-60	1.25	0.18	15.90
	60-85	1.65	0.08	16.38
Tierra Delgada sin piedra y Alto Rendimiento	0-15	5.74	0.29	2.07
	15-25	4.68	0.28	2.25
	25-55	5.34	0.18	2.45
	55-60	4.68	0.17	2.74
	60-75	1.91	0.15	19.90

Clase de Tierra	Profundidad	Materia Orgánica	Nitrógeno (%)	Fosforo (ppm)
Tierra Gruesa	0-10	2.44	0.21	2.59
	10-20	3.10	0.19	18.75
	20-30	1.78	0.13	19.42
	30-70	1.78	0.10	20.38
	70-90	0.59	0.07	2.75
	90-102	0.86	0.04	3.16
	102-120	1.12	0.06	23.56

Con base en el Cuadro anterior se puede determinar que la fertilidad de los suelos no está directamente relacionada con la cantidad de Materia Orgánica, Nitrógeno y Fósforo en cada clase, como lo mencionan los productores. El factor de fertilidad es la profundidad que tiene cada clase de tierra.

Otros cultivos que se han establecido en la zona de estudio es la col o repollo y el pasto de jardinería que es cosechado en rollos y necesita del mismo suelo que se tiene, para mantenerlos frescos (Figura 5.9)



Figura 5.9. Extracción de rollos de pasto.

El manejo agronómico y los sistemas de labranza que se llevan a cabo en todas las clases de tierra es el mismo desde hace cincuenta años. Los trabajos inician con un subsuelo, en el cual se utiliza un implemento que consta de tres o cinco picos y tiene como función romper el suelo; después entra el arado que es el encargado de voltear la tierra; a esta acción le llaman barbecho. El siguiente paso es inundar el suelo a través de un riego por gravedad, después se esperan a que se evapore el agua y entierran una vara. Si esta entra y sale sin llenarse de lodo, se le denomina “tapar jugo”. Esto se realiza con una rastra de veinte discos y a los tres días se siembra el maíz. Cuando el maíz tiene tres hojas se aplica un fertilizante foliar y un producto preventivo para el carbón de la espiga, posteriormente cuando el maíz tiene seis hojas se aplica un producto de triple fórmula (compuesto fertilizante).

Los riegos se aplican cada que el maíz lo necesite a criterio del productor siendo aproximadamente cada 25 días. La cosecha se realiza con una trilladora y todo el forraje queda tendido en la milpa. Además, los productores indican que es necesario utilizar una desvaradora para triturar las cañuelas que han quedado en el suelo, y es aquí donde existen dos opciones; la primera es si el productor decide sembrar un cultivo de invierno (avena, triticale, cebada) entonces todo el zacate (forraje derivado de la cosecha de maíz) es incorporado al suelo con una rastra de discos y se aprovecha esta actividad para tirar la semilla. Por otro lado, si el productor decide que es momento de sembrar alfalfa, entonces el rastrojo es empacado y retirado de la milpa. ¿Cuándo sembrar alfalfa y cuando no? El ciclo de maíz es de cinco años aproximadamente, después de este tiempo se siembra alfalfa que al ser un cultivo perenne se queda establecida por tres años y la rotación comienza nuevamente (Figura 5.10).



Figura 5.10. Manejo Agronómico.

De acuerdo con la calidad de las tierras, los dueños de cada una de ellas establecen una tarifa de arrendamiento, las cuales están establecidas en función de la fertilidad de los suelos. Las tierras gruesas son las más costosas, mientras que las delgadas con piedra son las más baratas. El arrendamiento se hace bajo un contrato y se realiza de forma anual (Figura 5.11).

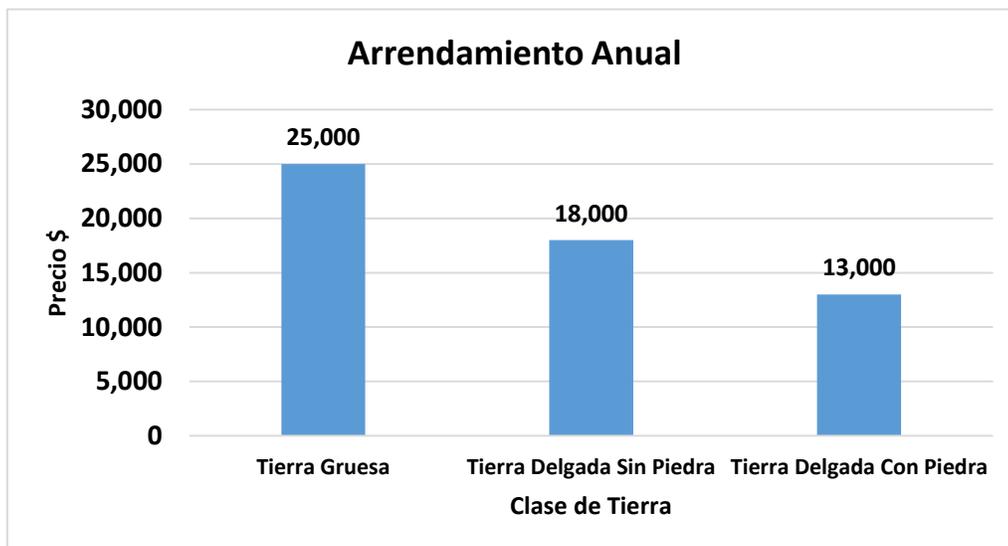


Figura 5.11. Precio de la renta anual de las Clases de Tierra.

5.5 ANÁLISIS DE AGUA RESIDUAL DE LOS CANALES ELBA Y REQUENA

5.5.1 Resultados de los análisis de las muestras de agua

Los resultados obtenidos del análisis de las muestras de agua, se muestran en los Cuadros 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 en estos cuadros se reporta los resultados de pH, conductividad eléctrica, aniones y cationes; por ciento de error en la suma de cationes y aniones; relación de sólidos evaporados; relación de sólidos calcinados y los sólidos orgánicos.

Cuadro 5.5. Localización de las Muestras de Agua.

Muestra	Sitio de Muestreo	Coordenadas		Temperatura
		Latitud Norte	Longitud Oeste	°C
Canal Elba	Col. La Puerta.	20° 15' 51.15"	99° 07' 17.34"	20
Canal Requena	Col. San Juan Tepa	20° 13' 28.10"	99° 05' 12.54"	19

Las muestras de agua fueron colectadas en las compuertas donde represa el agua en cada uno de los canales. La muestra del canal Elba se tomó en la compuerta 17 mientras que la correspondiente al canal Requena fue colectada en la toma 19.

Cuadro 5.6 Determinación de pH y Conductividad Eléctrica (mmhos/cm).

Muestra	Sitio de Muestreo	pH	CE (mmhos/cm)
Canal Elba	Col. La Puerta.	7.5	1.4
Canal Requena	Col. San Juan Tepa	7.7	1.7

El pH de ambos canales es alcalino, y la conductividad eléctrica muestra que las concentraciones de los cationes son bajas. Más adelante se utilizarán estos valores para evaluar estas concentraciones de manera más específica.

Cuadro 5.7. Determinación de Aniones y Cationes.

Muestra	Aniones				Cationes			
	CO_3 meq/L	HCO_3 meq/L	Cl meq/L	SO_4 meq/L	Ca meq/L	Mg meq/L	K meq/L	Na meq/L
Elba	0.2	18.4	5.0	1.6	3.0	2.5	0.6	6.8
Requena	0.1	14.7	8.8	2.25	4.0	2.5	0.7	11

Al momento de evaluar la calidad del agua siempre es buen precedente tomar en cuenta las concentraciones más elevadas de anión y catión. Para ambas muestras tenemos el bicarbonato de sodio como factor de calidad tal como lo muestra la Figura 5.12.

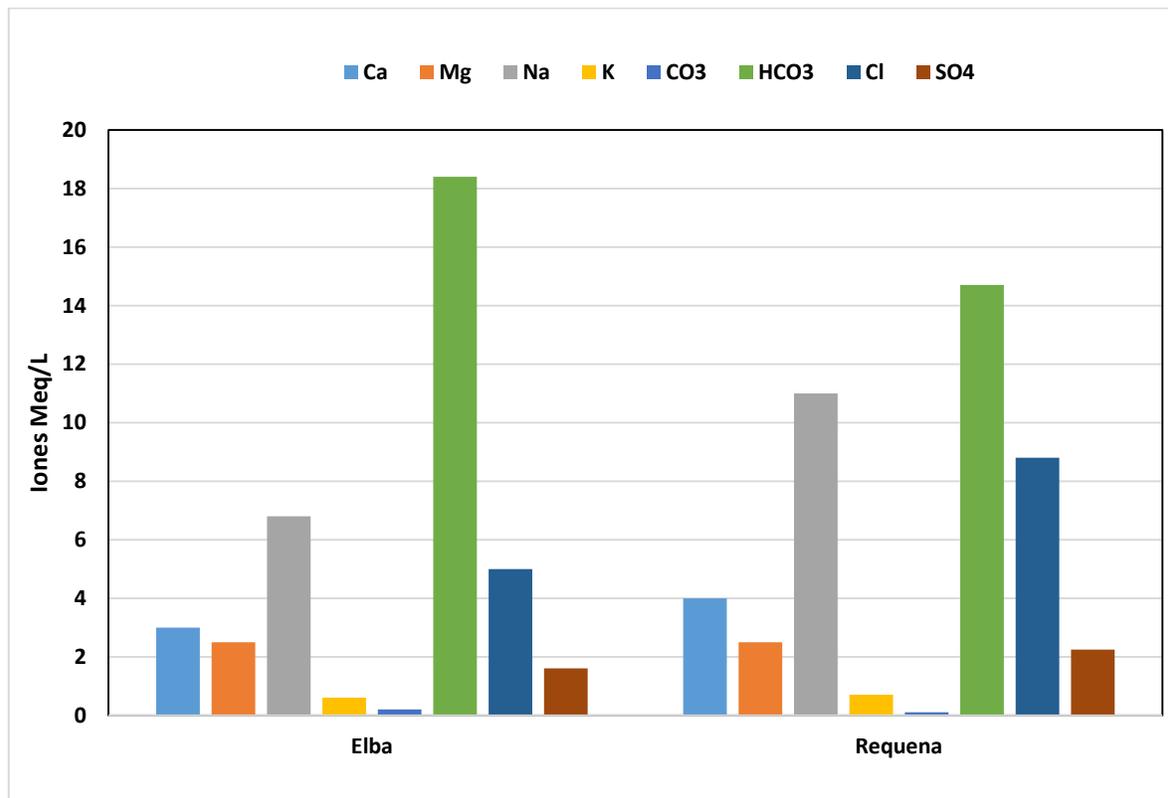


Figura 5.12. Diagrama de Iones Determinados.

Cuadro 5.8. Determinación de residuo seco evaporado, residuo seco calcinado y solidos totales disueltos.

Muestra	RSE	RSC	Solidos Orgánicos
Canal Elba	550	446	104
Canal Requena	550	426	124

La muestra de agua perteneciente al canal Requena presenta la mayor concentración de solidos orgánicos. Es preciso recordar que este canal se caracteriza por recibir de manera directa las descargas de la Ciudad de México; mientras que el canal Elba se concentra en la presa Endho donde posiblemente muchos solidos orgánicos son depositados en el fondo de la misma.

5.5.2 Cálculo del índice de RAS y PSI

Los resultados de RAS y PSI se muestran en el Cuadro 5.9. Con estos índices fue posible valorar sobre los contenidos de sodio que tiene el Canal Elba y Requena. De acuerdo con Richards (1973) las aguas con un RAS menor a 10 se clasifican como S1 y son consideradas bajas en sodio. En este caso ambas muestras de agua se encuentran catalogadas como S1.

Cuadro 5.9. Cálculo de la Relación de Adsorción de Sodio, Porcentaje de Sodio Intercambiable y su clasificación.

Muestra	Clasificación de Aguas Para Riego						Observaciones
	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	RAS meq/L	PSI	Clasificación	
Elba	3.0	2.5	6.8	4	5	S1	Puede ser usada para riego en casi todos los suelos.
Requena	4.0	2.5	11	6	7	S1	Puede ser usada para riego en casi todos los suelos.

5.5.3 Cálculo de salinidad efectiva

Los criterios de clasificación que se tienen sobre el índice de salinidad efectiva son los siguientes:

Buena: SE < 3.0 Condicionada: 3.0 – 15.0 No recomendable > 15.0

Con base en lo anterior se realizó la clasificación que muestra en el Cuadro 5.10.

Cuadro 5.10. Resultados de la Salinidad Efectiva de las Muestras de Agua.

Muestra	CO ₃ meq/L	HCO ₃ meq/L	Ca meq/L	Mg meq/L	K meq/L	Na meq/L	Índice de salinidad efectiva	Clasificación de la salinidad efectiva
Elba	0.2	18.4	3.0	2.5	0.6	6.8	-5.70	Buena
Requena	0.1	14.7	4.0	2.5	0.7	11	3.40	Condicionada

La muestra de agua perteneciente al canal Elba es buena ya que no presenta problemas de salinidad. Respecto, a la muestra del canal Requena empieza a tener problemas ya que se clasificó como condicionada de tal manera que si no se atiende este problema con el paso del tiempo afectará de manera severa a los cultivos y los suelos del módulo de riego de Tepatepec.

5.5.4 Clasificación de Ayers y Wescot (1987) utilizando CE y los STD

La clasificación propuesta por este autor se apoya en el uso del Cuadro 5.10, el cual utiliza valores de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos, y los resultados obtenidos se encuentran en el Cuadro 5.11.

	GRADO DEL PROBLEMA.		
	NULO	LIGERO A MODERADO	SEVERO
CEa	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
STD	< 450	450-2000	> 2000

Cuadro 5.11. Criterios de clasificación de Ayers y Wescot (1987).

Cuadro 5.12. Resultados de la clasificación según Ayers y Wescot (1987).

Muestra	CE (mmhos/cm)	Grado del Problema	Solidos Totales disueltos	Grado del Problema
Canal Elba	1.4	Ligero	104	Nulo
Canal Requena	1.7	Ligero	124	Nulo

5.5.5 Clasificación de aguas según Richards (1954) utilizando CE

La clasificación asignada por Richards (1954) respecto a la conductividad eléctrica ambas muestras son catalogadas como C3 y tienen la limitante de usarse en suelos con drenaje (Cuadro 5.13).

Cuadro 5.13 Clasificación respecto a la conductividad eléctrica.

Muestra	CE (mmhos/cm)	Clasificación
Canal Elba	1.4	C3
Canal Requena	1.7	C3

Utilizando la clasificación de Richards (1954), el uso de agua residual sin tratar de los dos canales que abastecen el módulo de riego de Tepatepec no puede ser utilizada en suelos que no tienen un buen drenaje, ya que la cantidad de sal puede generar problemas en la conductividad hidráulica.

En forma resumida se puede establecer que el agua del Canal Elba y Requena pueden ser utilizadas para el riego, pero es necesario estar pendiente ya que empiezan a tener limitantes en su uso y el hecho de no tratarlas podría impedir su uso en el futuro.

5.6 METALES PESADOS

Actualmente, no existe ninguna norma o legislación que regule la concentración de metales pesados en el suelo y establezca los límites máximos permisibles, donde se utilice agua residual para el riego. Sin embargo, Kabata-Pendias y Pendias (2004), establecieron niveles estándar de elementos traza para la valoración de la contaminación del suelo que se tomaron en cuenta para precisar la toxicidad de los suelos del módulo de riego “Tepatepec”

Para cada sitio de muestreo se calcularon los valores de metales pesados de cada horizonte hasta llegar a la roca. La determinación se realizó con la finalidad de establecer si la concentración de metales aumenta o disminuye a medida que incrementa la profundidad del suelo. Los datos para cada sitio se muestran en las siguientes gráficas:

5.6.1 Tierra Delgada con Piedra Bajo Rendimiento

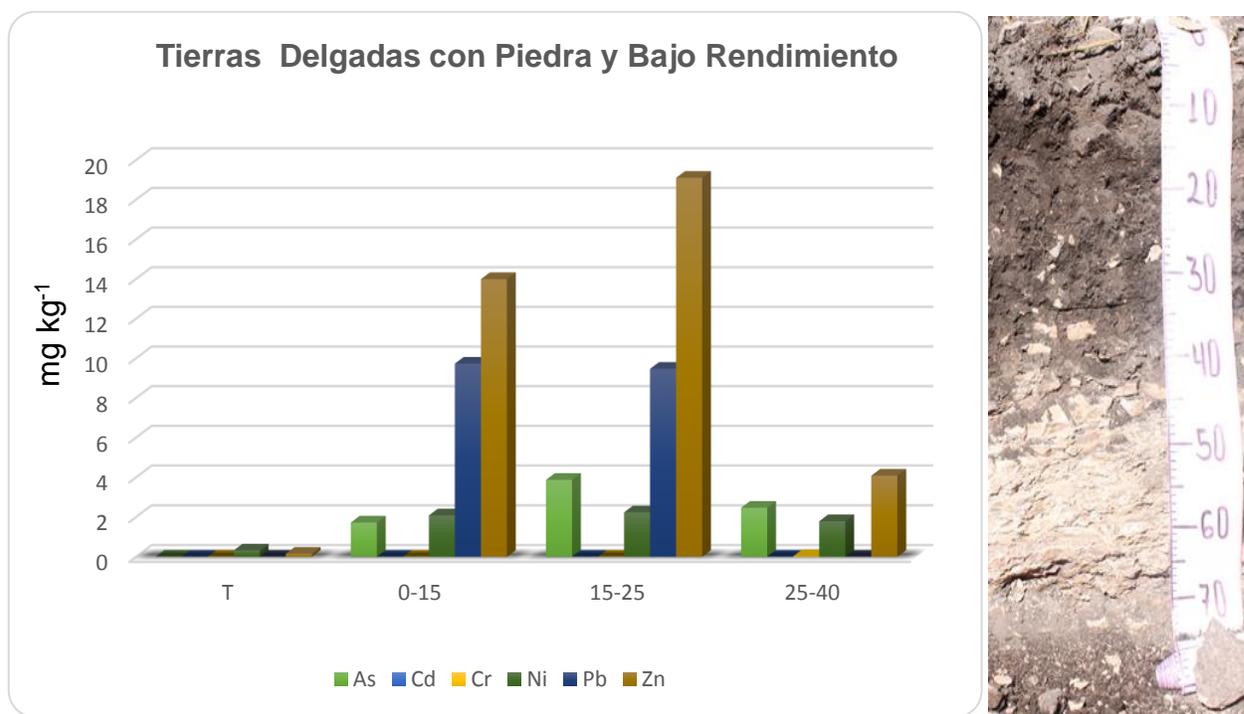


Figura 5.13. Distribución de Metales Pesados en Tierras Delgadas con Piedra de Bajo Rendimiento

Esta clase de tierra se encuentra situada en la localidad de Dos cerros Municipio de Mixquiahuala de Juárez, y una pendiente del 3%. El gráfico 5.13 muestra la distribución y cantidad de metales a diferentes profundidades. En esta figura se puede observar que en el horizonte superficial (0-15 cm), la mayor concentración fue de Zn con 13.9 mg kg^{-1} , seguidos de Pb con 9.7 mg kg^{-1} y Ni con 2.08 mg kg^{-1} ; mientras que la menor concentración fue de As con 1.72 mg kg^{-1} . Para el caso de Cd y Cr no se detectaron a esta profundidad.

A una profundidad de 15 a 25 cm, la cantidad de Zn aumenta hasta 19.1 mg kg^{-1} ; mientras que para el caso de Pb y Ni la cantidad presente es muy semejante al de 0-15 cm. En el caso del As, la cantidad encontrada aumentó hasta 3.87 mg kg^{-1} ; nuevamente a esta profundidad no se detectó Cd y Cr.

Para el último, horizonte que corresponde a la una profundidad de 25 a 40 cm, la cantidad de metales disminuye considerablemente. El Zn es el elemento que predomina con una cantidad de 4.08 mg kg^{-1} , seguido de As con 2.46 mg kg^{-1} y Ni con 1.78 mg kg^{-1} ; nuevamente igual que los anteriores horizontes no se detectó presencia de Cd y Cr.

Ramos *et al.* (2001) reportan la presencia de metales pesados en suelos y concluye que éstos tienden a concentrarse en la parte superficial del suelo; sin embargo, para esta localidad la mayor concentración de metales analizados se encontró en la capa que va de los 15 a los 25 cm y va disminuyendo conforme aumenta la profundidad del suelo. A pesar de haber detectado metales pesados en Tierras delgadas con Piedras y Bajo Rendimiento la cantidad no representa toxicidad de acuerdo con lo establecido por Kabatas-Pendias (2004), con excepción del As en donde reportan que no debe existir ninguna concentración en el suelo.

5.6.2 Tierra Delgada con Piedra y Alto Rendimiento

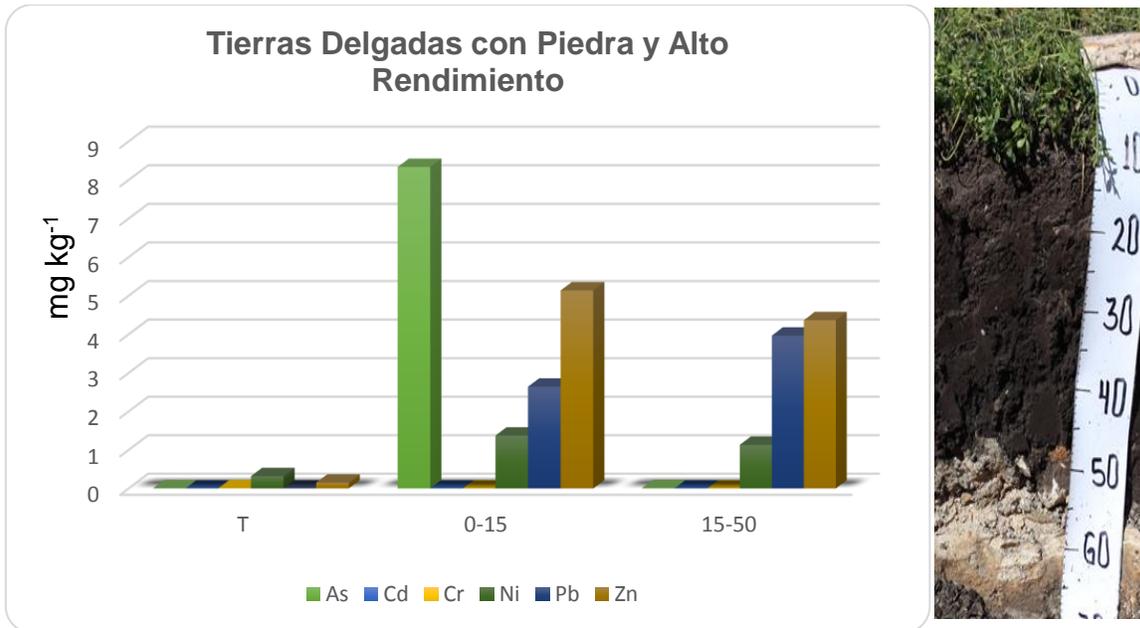


Figura 5.14. Distribución de Metales Pesados en la Tierras Delgadas con Piedra de Alto Rendimiento

Las Tierras delgadas con piedra de alto rendimiento se encuentran localizadas en la localidad de Dos cerros Municipio de Mixquiahuala de Juárez y tiene una pendiente del 4%. La profundidad de estas tierras es de 50 cm.

El primer horizonte, que corresponde a una profundidad de 0-15 cm, la mayor cantidad de los metales evaluados fue el arsénico con 8.3 mg kg⁻¹, seguido del Zn, Pb y Ni con 5.1, 2.6 y 1.3 mg kg⁻¹ respectivamente. En este horizonte no se detectó la presencia de Cd y Cr.

Para el segundo horizonte, (de 15 a 50 cm) solo se encontraron presentes los metales Zn, Pb y Ni con valores de 4.3, 3.9 y 1.1 mg kg⁻¹ y no se detectó Cd, Cr y As (Figura 5.14).

En este perfil se observa que a mayor profundidad la cantidad de metales pesados disminuye; sin embargo, para el caso del Pb la concentración aumentó acumulándose en el último horizonte del suelo. Para el caso del Zn, As y Ni la mayor acumulación se da en la capa superficial del suelo la cual se encuentra en contacto con el material vegetal. Las concentraciones de metales pesados en

ambos horizontes, no rebasan los límites máximos establecidos de acuerdo con Kabatas-Pendias (2000)

Méndez *et al.* (2000), mencionan que la concentración de metales pesados disponibles en el suelo no representa ningún problema para los cultivos, cuando las concentraciones no exceden los límites máximos permisibles establecidos, sin embargo, para este estudio no se realizó el análisis al tejido vegetal.

5.6.3 Tierra Delgada Sin Piedra y Bajo Rendimiento

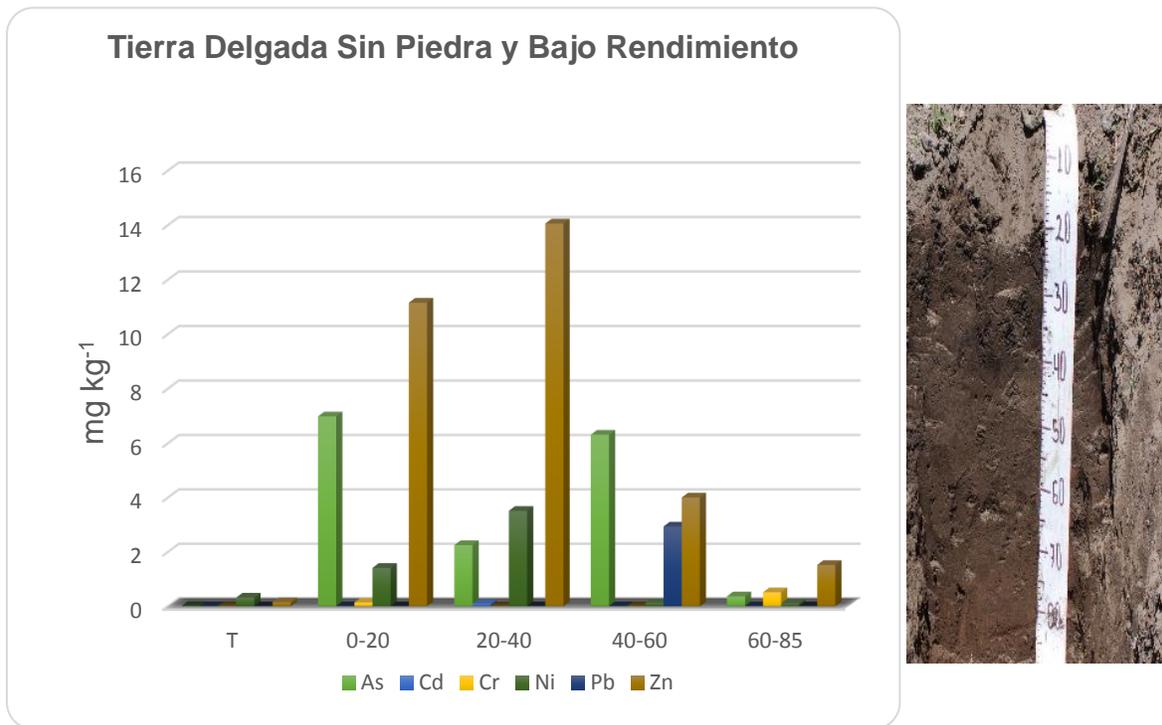


Figura 5.15. Distribución de Metales pesados en la Tierras Delgadas sin Piedra y Bajo Rendimiento.

Este tipo de tierras se encuentran localizadas en la 4ta demarcación del municipio de Francisco I. Madero Hidalgo, a una altitud de 1982 msnm y una pendiente del 2%.

Para este perfil se cavó un pozo pedológico hasta los 85 cm de profundidad y se describieron 4 horizontes. El primer horizonte se estableció desde la superficie del suelo y hasta los 20 cm de profundidad; en éste se encontró que la concentración

de Zn fue la más alta con 11.1 mg kg^{-1} , seguido de As con 6.9 mg kg^{-1} , y Ni con 1.4 mg kg^{-1} para el caso de Cd, Cr y Pb no se detectaron valores de estos.

El segundo horizonte se estableció de los 20 a los 40 cm, en donde la mayor concentración fue de Zn con 14 mg kg^{-1} , Ni con 3.5 y As con 2.2 mg kg^{-1} , siendo notoria la disminución de As a esta profundidad (Figura 5.15).

5.6.4 Tierra Delgada Sin Piedra y Alto Rendimiento

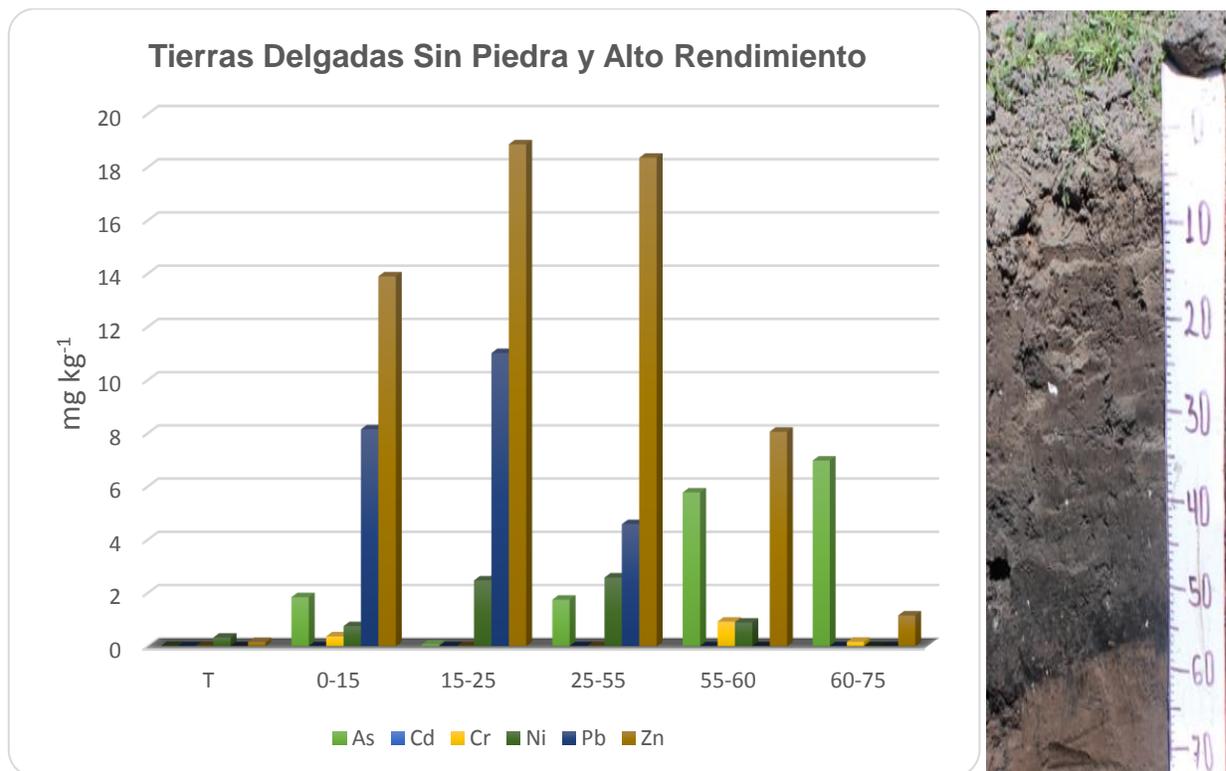


Figura 5.16 Distribución de Metales pesados en la Tierras Delgadas Sin Piedra y Alto Rendimiento

El perfil se localiza en la localidad de la 4ta Demarcación en el municipio de Francisco I. Madero, a una altitud de 1984 msnm y una pendiente del 3% (Figura 5.16).

La profundidad del pozo fue de 75 cm y se pueden distinguir 5 horizontes en este perfil. El primero corresponde de la superficie y hasta los 15 cm. En este se

observa que la mayor concentración de metales corresponde al Zn con 13.8 mg kg⁻¹, seguido de Pb y As con 8.1, y 1.8 mg kg⁻¹, respectivamente. Para el resto de los metales analizados la concentración fue de 0 para el caso de Cd, Cu y Ni.

Para el perfil que corresponde a una profundidad de 15 a 25 cm la concentración de Zn, Pb, y Ni aumentó a 18.8, 11.0 y 2.4 mg kg⁻¹; mientras que el As disminuyó y Cr y Cd no se encontraban presentes en el horizonte.

En el tercer horizonte, que comprende profundidades de 25 a 55 cm, la concentración de metales fue muy semejante al anterior con excepción del Pb en donde la concentración disminuyó hasta 4.5 mg kg⁻¹

En el horizonte de 55 a 60 cm se puede observar que existe una acumulación en la cantidad de As (5.7 mg kg⁻¹); mientras que la cantidad de Zn disminuye hasta 8.0 mg kg⁻¹. El Pb y Cd no se encuentran presentes en este horizonte y la concentración de Cr es más alta (0.92 mg kg⁻¹) e iguala a la concentración al Ni.

Para el horizonte más profundo (60-75 cm), la acumulación de As es más notoria ya que alcanza valores de 6.9 mg kg⁻¹; mientras que el valor Zn disminuye hasta 1.1 mg kg⁻¹. El valor de la concentración del resto de los metales es cercano a 0.

En relación con los resultados encontrados para este tipo de tierra, los metales pesados una vez depositados en el suelo tienden a permanecer, al menos inicialmente, en los horizontes superficiales. Estos metales pueden ser sometidos a procesos de retención semejantes a los que ocurren en suelos naturales, con la salvedad de que suelen ser incorporados en mayores concentraciones y bajo formas complejas muy variables dependiendo de la fuente contaminante. Entre estos procesos están la precipitación como fase sólida del suelo, adsorción por coloides inorgánicos-arcillas, óxidos y oxihidróxidos de Fe y Mn y sobre materia orgánica (Elliot, 1983), y reacciones de quelatización con la materia orgánica del suelo.

La persistencia de estos metales pesados en los suelos es mayor que en cualquier otro medio de la biosfera y la contaminación que producen resulta virtualmente permanente. Su carácter tóxico y acumulativo ocasiona daños en plantas, animales y el hombre. El frecuente vertido de contaminantes sobre el suelo a

través de las aguas de riego crudas, puede llegar a superar la capacidad de retención, fijación y adsorción de los mismos (Méndez *et al.*, 2003).

5.6.5 Tierra Gruesa

El perfil se localiza en la comunidad de San Juan Tepa en el Municipio: Francisco I. Madero Estado a una altitud de 1991 y con una pendiente tiene un relieve: regular Pendiente: 5%

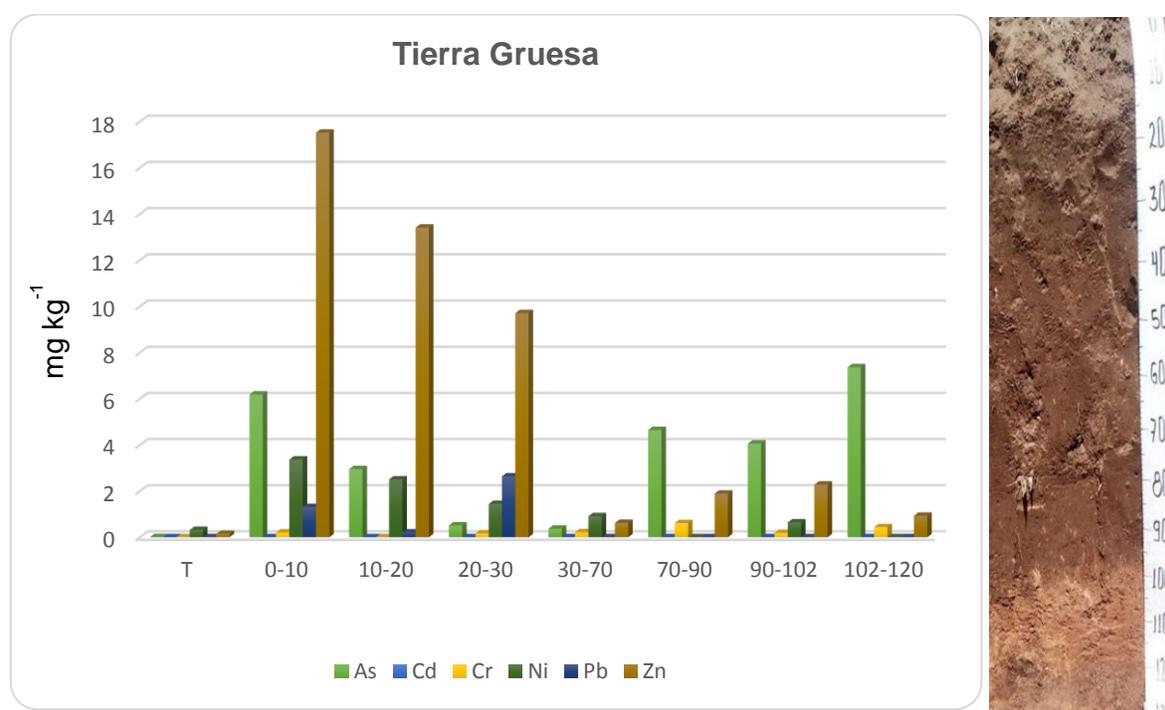


Figura 5.17. Distribución de Metales Pesados en Tierras Gruesas.

Es en este perfil donde la profundidad máxima alcanzó 120 cm encontrando 7 horizontes en el mismo (Figura 5.17).

En la capa superficial (0 a 10 cm), la cantidad de Zn es más alta en comparación con el resto de los horizontes alcanzando valores de 17.5 mg kg⁻¹ y va disminuyendo conforme aumenta la profundidad del perfil. Para el caso del Cd, no se encontró presente a ninguna profundidad del suelo; mientras que el Cr alcanzó su máxima concentración entre los 70 y 90 cm.

5.7 ESTABILIDAD Y AGREGACIÓN

Los análisis de estabilidad y agregación se realizaron en el laboratorio de física de suelos y se evaluaron las muestras en seco y en húmedo. En cada uno de los casos se trabajó con 100 gramos de suelo sin tamizar. Se tomó una muestra de la capa arable (aproximadamente 30 cm) de cada uno de los sitios (Cuadro 5.14) donde se cavaron los pozos pedológicos.

Cuadro 5.14. Claves de los sitios de muestreo.

Id	Clase de Tierra
P1	Tierra delgada con piedra Bajo Rendimiento
P2	Tierra Delgada Sin Piedra Bajo Rendimiento
P3	Tierra Delgada Sin Piedra Alto Rendimiento
P4	Tierra Gruesa
P5	Tierra Delgada Con Piedra Alto Rendimiento

Los resultados obtenidos de las muestras en húmedo y en seco se presentan en las siguientes gráficas:

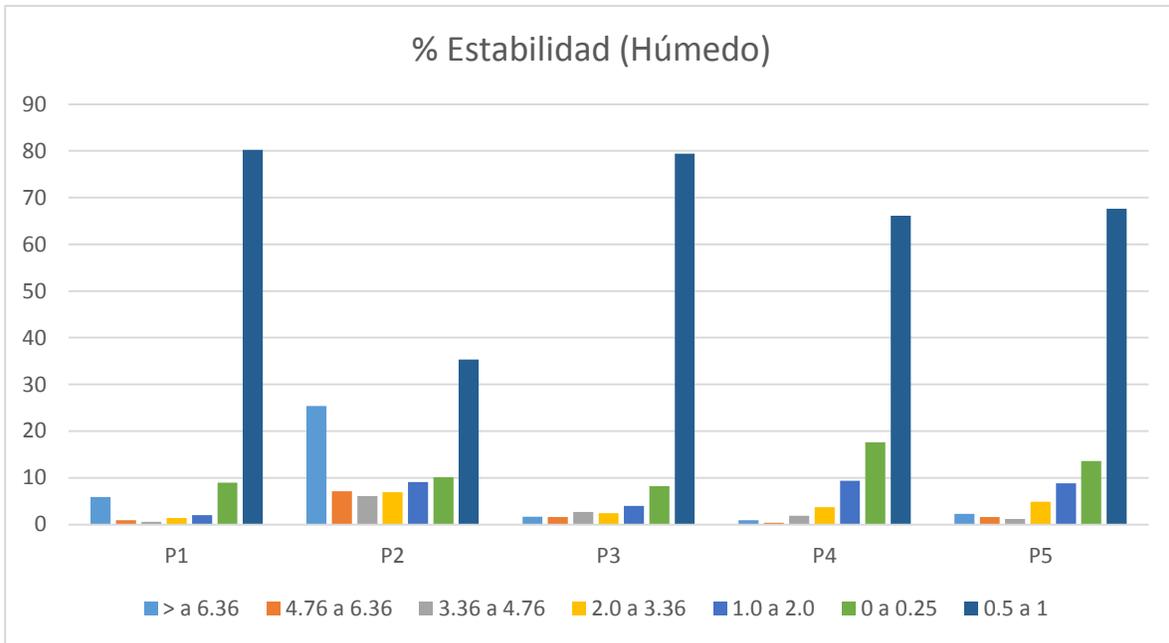


Figura 5.18. Estabilidad y Agregación en Húmedo.

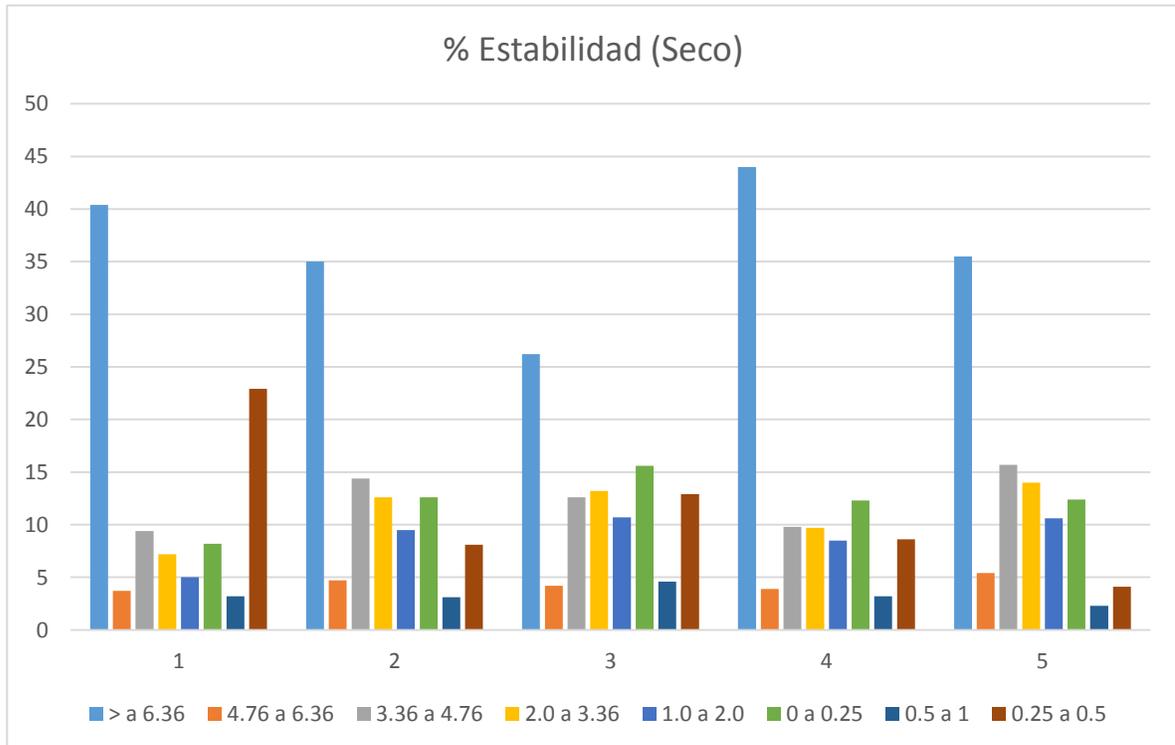


Figura 5.19. Estabilidad y Agregación en Seco.

Lo que se observa en las gráficas anteriores es que lo que tenemos en los suelos del módulo de riego de Tepatepec son macro agregados con una buena estabilidad, ya que al momento de someter las muestras húmedas en los tamices más del 70% de la muestra logro pasar hasta el tamiz más pequeño que en este caso fue de 0.5 a 1.0 cm caso contrario sucedió con la muestra seca ya que la mayor parte del suelo no paso del primer tamiz que tiene una dimensión de 6.36 cm. Esta Esta estabilización se debe esencialmente a la acción cementante de las sustancias inorgánicas y orgánicas. Aun cuando las arcillas, el carbonato de calcio y los sesquióxidos participan en la agregación, el principal agente de unión es la materia orgánica (Koorevaar, *et al.*, 1983). El riego, en combinación con la aplicación de materia orgánica y el tiempo de incorporación a la agricultura, es determinante en los cambios estructurales de los suelos arcillosos (Segura, *et al.*, 2000) que para el caso del riego con aguas residuales el aporte al cambio estructura del suelo es determinante.

5.8 ANÁLISIS DE SECCIONES DELGADAS

5.8.1 Tierra Delgada Con Piedra y Bajo Rendimiento

Esta clase presenta un porcentaje de porosidad del 34.23% y 65.77% de agregación tal como se muestra en la Figura 5.20.

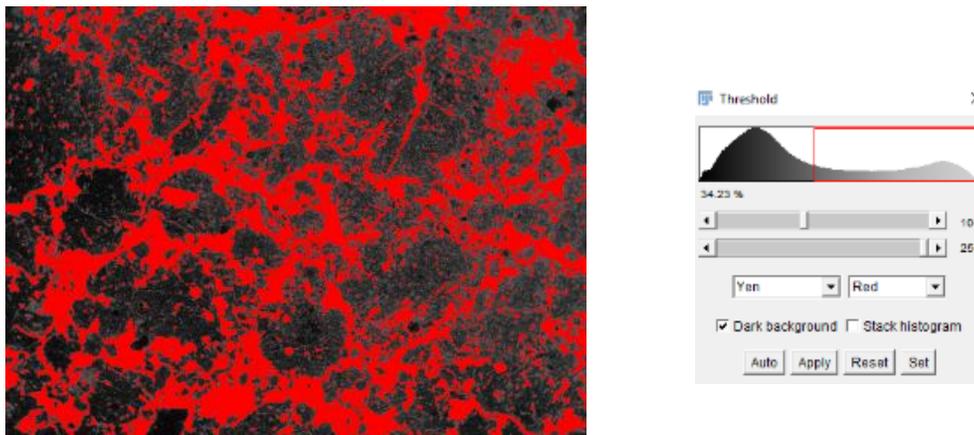


Figura 5.20. Porosidad de la Tierra Delgada con Piedra y Bajo Rendimiento

5.8.2 Tierra Delgada Con Piedra y Alto Rendimiento

Esta clase presenta un porcentaje de porosidad del 41.27% y 58.73% de agregación tal como se muestra en la Figura 5.21.

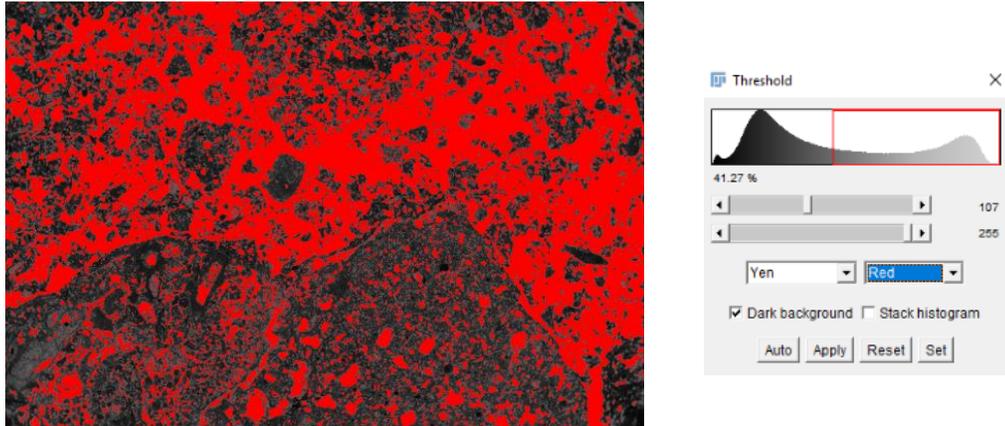


Figura 5.21 Porosidad de la Tierra Delgada con Piedra y Alto Rendimiento.

5.8.3 Tierra Delgada Sin Piedra y Bajo Rendimiento

Esta clase presenta un porcentaje de porosidad del 20.05% y 71.45% de agregación tal como se muestra en la Figura 5.22.

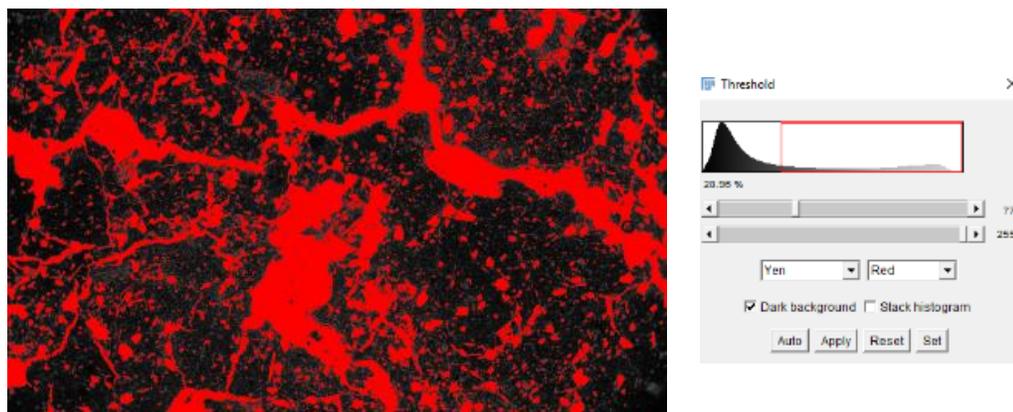


Figura 5.22. Porosidad de la Tierra Delgada sin Piedra y Bajo Rendimiento.

5.8.4 Tierra Delgada Sin Piedra y Alto Rendimiento

Esta clase presenta un porcentaje de porosidad del 33.80% y 66.20% de agregación tal como se muestra en la Figura 5.23.

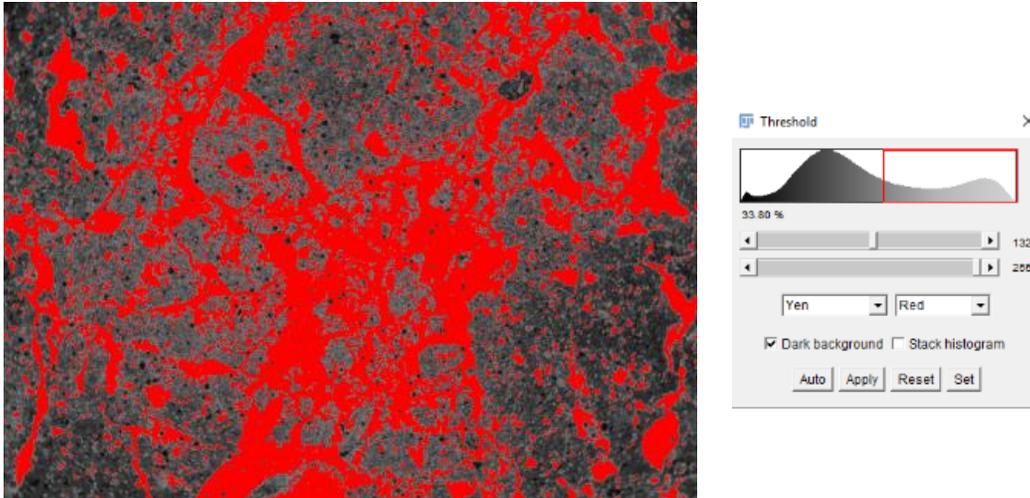


Figura 5.23. Porosidad de la Tierra Delgada sin Piedra y Alto Rendimiento.

5.8.5 Tierra Gruesa

Esta clase presenta un porcentaje de porosidad del 19.60% y 80.40% de agregación tal como se muestra en la Figura 5.24.

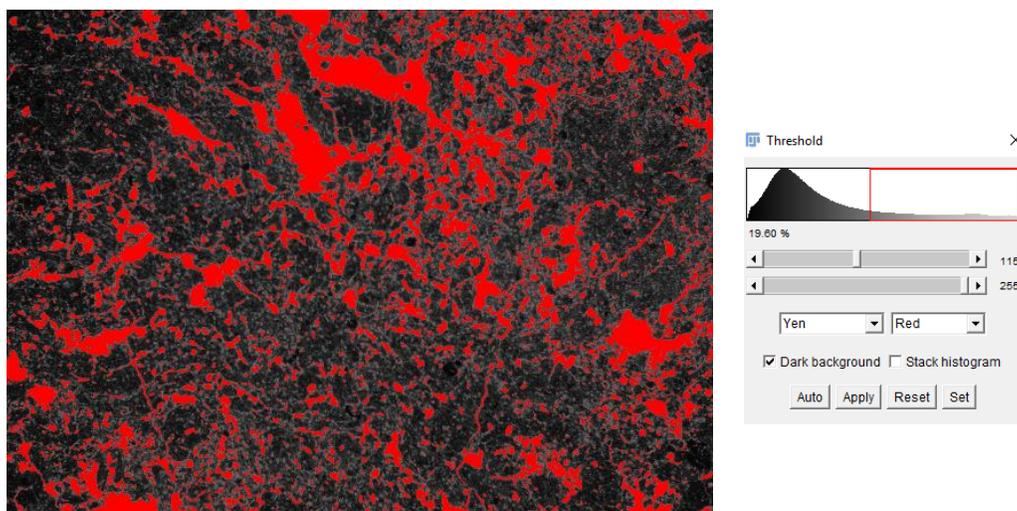
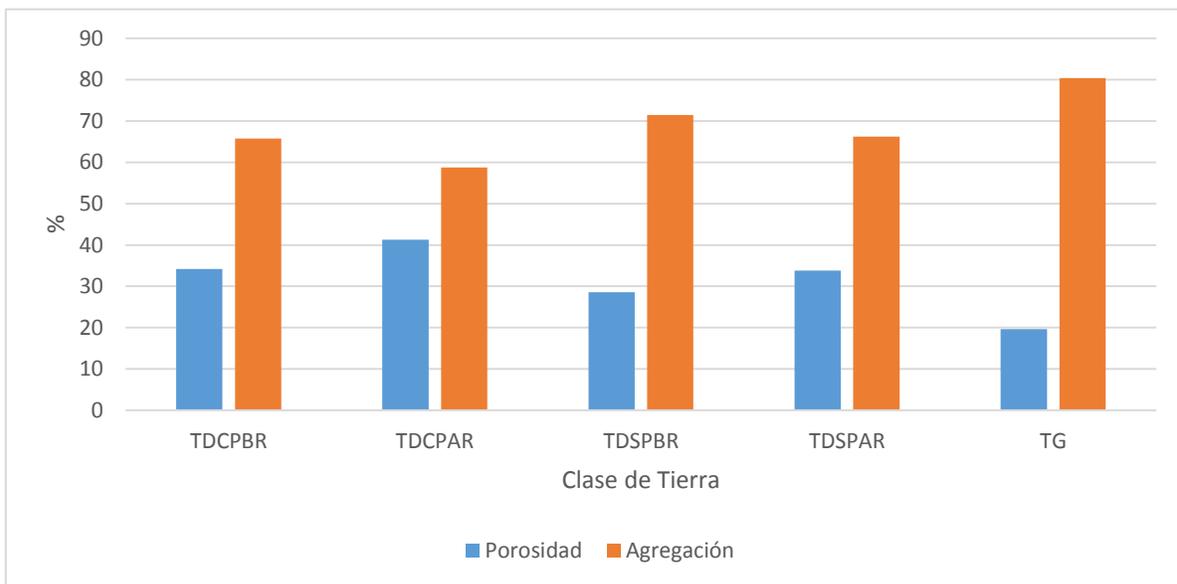


Figura 5.24. Porosidad de la Tierra Gruesa.

Para conocer las variaciones de la porosidad de las distintas clases de tierra se elaboró un diagrama (Figura 5.25) en el que se observa que la Tierra Gruesa es la que tiene la menor cantidad de porosidad debido a los contenidos de sal que están provocando una compactación del suelo. La Tierra Delgada con Piedra Alto Rendimiento presenta la mayor cantidad de porosidad, esto se debe a que las incorporaciones de sodio son menores debido a la fuente de irrigación.



****TDCPBR=** Tierra Delgada Con Piedra Bajo Rendimiento, ****TDCPAR=** Tierra Delgada Con Piedra Alto Rendimiento, ****TDSPBR=** Tierra Delgada Sin Piedra Bajo Rendimiento, ****TDSPAR=** Tierra Delgada Sin Piedra Alto Rendimiento, ****TG=** Tierra Gruesa

Figura 5.25. Porosidad y Agregación de las distintas Clases de Tierras.

VI CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se puede llegar a las siguientes conclusiones:

En el Módulo de Riego “Tepatepec” con base al conocimiento del recurso suelo se identificaron tres clases de tierra irrigadas con agua residual sin tratar las cuales son Tierra Delgada Con Piedra, Tierra Delgada Sin Piedra y Tierra Gruesa.

La calidad de las clases de Tierra está en función de la profundidad y del número de riegos que se aplican, siendo la mejor la Tierra Gruesa.

De acuerdo con la taxonomía de suelos se clasifican como Inceptisols mientras que con a la WRB como Antrosoles, lo cual significa que este último sistema refleja los procesos de antrosolitización que están ocurriendo en la zona de estudio como resultado de la irrigación con agua residual.

Las cantidades de Materia Orgánica, Nitrógeno y Fósforo además de altos porcentajes de agregados estables se encuentran en niveles óptimos para el desarrollo de la agricultura. Además, los suelos no son salinos y no tienen concentraciones de metales pesados que pueden afectar la salud.

La calidad del agua en este momento es buena para desarrollar actividades agrícolas, aunque es necesario analizar la contaminación biológica y un mayor número de estudios relacionados con la presencia de arsénico

VII RECOMENDACIONES

Es necesario realizar estudios de fertilidad de suelo de manera periódica para evaluar los nutrientes del suelo.

Al momento de sembrar se debe considerar una pendiente del terreno de un 2% como mínimo para evitar encharcamientos de agua.

Se deben realizar estudios de metales pesados en las plantas y en las muestras de agua. Principalmente sobre arsénico que constituye el mayor riesgo.

Las rotaciones de cultivo deben de continuar.

VIII. LITERATURA CITADA

Aceves, E. 1979. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México, México.

Acosta-Álvarez, M.M. 2007. Determinación de Metales Pesados en Suelos Agrícolas del Valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 101 p.

Adderley, W.P., Simpson, I.A., Davidson, D.A. 2002. Colour description and quantification in mosaic image of soil thin sections. *Geoderma* 108: 181– 195

Ayers, R. S. y D. W. Westcot. 1987. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Trad. Al español por J.F. Alfaro de: Water quality and use in agriculture.

Barthés B. and E. Roose. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena* 47: 133-149.

Beltran, J. Irrigation with saline water: benefits and environmental impact. *Agricultural Water Management*. Vol. 44, 1999, pp. 183-194.

Belaid N., Nee C., Kallel M., Ayoub T., Ayadi A., Baudu M. 2012. Long term effects of treated wastewater irrigation on calcisol fertility: A case study of Sfax-Tunisia. *3(5)*: 702-713.

Boix-Fayos, C., A. Calvo-Cases, A.C. Imeson and M.D. Soriano-Soto. 2001. Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. *Catena* 44: 47-67.

Brady, N.C. and R.R. Weil. 1999. The nature and properties of soils. 12th ed. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey. 863 pp.

Burés, S. 1997. Sustratos. Ediciones agrotécnicas. Madrid, España. 342 p.

Caldwell, D.E. y Germida, J.J., 1985. Evaluation of difference imagery for visualizing and quantitating microbial growth. *Can. J. Microbiol.*, 31: 35-44.

Cammeraat, L.H. and A.C. Imeson. 1998. Deriving indicators of soil degradation from soil aggregation studies in southeastern Spain and southern France. *Geomorphology* 23: 307-321.

Cervantes-Carrillo, F.; Pérez, J.; Gómez, J. 2000. Avances en la Eliminación Biológica del Nitrógeno de las Aguas Residuales. *Revista Latinoamericana de Microbiología* 42:73-82.

Correia, G.T. Sanchez O.I., Gebara D., Matsumoto T. 2013. Remocion de fosforo de diferentes aguas residuales en reactores de lecho fluidizado trifásico con circulación interna. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia* 67:172-182

Cuanalo de la C., H. E. 1981. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

Deeks, L.K., Williams, A.G., Dowd, J.F., Scholefield, D.1999. Quantification of pore size distribution and the movement of solutes through isolated soil blocks. *Geoderma* 90: 65 86.

Deniz, F., Sadhwani, J., Veza, J. New quality criteria in wastewater reuse. The case of Gran Canaria. *Desalination*. Vol. 205, No. 2010, pp. 716-722

Downs, T.J., Cifuentes, E., Ruth, E., Suffet, I., 2000. Effectiveness of natural treatment in a wastewater irrigation district of the Mexico City Region: a synoptic field survey. *Water Environ. Res.* 72, 4–21.

Elliot HA 1983 Adsorption behaviour of cadmium in response to soil surface charges. *Soil Sci.* 136: 317-320.

Environmental Protection Agency (EPA). 2004. Reporte de calidad del agua potable. Edition of the Drinking Water Standards and Health Advisories EPA 822-R-04-005.

García, I. and Dorronsoro, C. 2005. Contaminación por Metales Pesados. En *Tecnología de Suelos*. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. <http://edafologia.ugr.es>.

Garza, V. 1994. La legislación ambiental en México en referencia a la generación y uso de aguas residuales. *Salud Fronteriza*. 1994; VIII (1): pp. 11-16.

Gutiérrez-Ruiz, M.E., Siebe, Ch., Cifuentes, E., Sommer, I., 1995. Environmental aspects of land application of wastewater from Mexico City metropolitan area: a bibliographical review and analysis of implications. *Environ. Rev.* 3, 318–330.

Hernández, A. E. E. 2015. Producción y manejo de caña de azúcar bajo agricultura de riego en Tlaquiltenango, Morelos. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Hillel, D. 1998. *Environmental soil physics*. Academic Press, San Diego Cal, E.U.A. 100-125 pp.

INEGI, 1994. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, *Sistemas de Cuencas Nacionales de México*.

IUSS Grupo de trabajo WRB. 2015. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo 2014. Actualización 2015. Sistema Internacional de Clasificación de Suelos para la Nomenclatura de Suelos y la creación de Leyendas de Mapas de Suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma.

Jiménez, B., Siebe, G., Cifuentes, E. 2005. El reúso intencional y no intencional del agua en el valle de Tula. En: El agua en México visto desde la Academia. México, D.F.: Academia Mexicana de Ciencias México, 33-57 pp.

Kaúrichev. 1984. Prácticas de edafología. Editorial Mir Moscú, URSS. 287 pp.

Koorevaar, P.; Menelik G.; Dirksen, C. 1983. Elements of soil physics. Elsevier Amsterdam. 228 pp.

Korber, D.R., Lawrence, J.R., Sutton, B. and Caldwell, D.E., 1989. Effect of laminar flow velocity on the kinetics of surface recolonization by *Mot +* and *Mot-Pseudomonas fluorescens*. *Microb. Ecol.*, 18: 1-19.

Lemaire, F. 1995. Physical, chemical, and biological properties of growing medium. *Acta Hort. (ISHS)* 396: 273-284.

Licona-Vargas, A. L., C. A. Ortiz-Solorio, Ma. del C. Gutiérrez-Castorena y F. Manzo-Ramos, 2006. Clasificación local de tierras y tecnología del policultivo café-plátano para velillo-sombra en comunidades cafetaleras. *Terra Latinoamericana* 24:1-7.

Lomelí G., V. 1996. Cambios antropogénicos de los Vertisoles de la cuenca del arroyo Ucum, Quintana Roo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Lucho, C.A., Álvarez, M., Beltrán, R.I., Prieto, F. and Poggi, H. 2005. A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. *Environmental International*, On Line: 0160- 4120-D 2004 doi: 10.1016/j.envint.2004.08.002.

Manga C.J., Palma-Acosta, M.J. 2005. Simulación de un sistema de fangos activados en discontinuo (SBR) para el tratamiento de aguas residuales con altos contenidos de nitrógeno. *Ingeniería y Desarrollo* 18: 61-71.

Mara, D. y S. Cairncross. 1990. Directrices para el uso sin riesgo de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura. España.

Martin, C.W. 2000. Heavy Metals Trends in Floodplain Sediments and Valley Fill. *Catena* 39, 53-68.

Méndez-Romero F., Gisbert-Blanquer J., García-Díaz J, y Marqués-Mateu Á. 2003. Relación estadística entre metales pesados y propiedades de suelos de cultivo regados con aguas residuales no depuradas. *Interciencia*, 28(5), 281-286. Recuperado en 07 de noviembre de 2017, de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442003000500007&lng=es&tlng=es.

Mendoza, H. 1981. "An evaluation of the use of Mexico city Wastewater on the irrigation of Crops". *Water Reuse Symposium II*. Washington D.C. August 23-28. 1981.

Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater Engineering. Treatment and Resource Recovery*. 5th Edition. Mc Graw Hill.

Molins-Legua C., Meseguer-Lloret S., Moliner-Martinez Y., Campíns-Falco P. 2006. A guide for selecting the most appropriate method for ammonium determination in water analysis. *Trends Anal. Chem.* 25(3), 282.

Morán, C.J., McBratney, A.B. y Koppi, A.J. 1989. A rapid method for analysis of soil macropore structure. I. Specimen preparation and digital binary image production. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 921-928.

Navarro, B.A., B. Figueroa, V.M. Ordaz y F.V. González. 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *TERRA* 18: 61-69.

Niewczas, J. and B. Witkowska. 2003a. Index of soil aggregates stability as linear function value of transition matrix elements. *Soil & Tillage Research* 70: 121-130.

Niewczas, J. and B. Witkowska. 2003b. Use of simplex algorithm for determination of soil aggregation extreme changes. *Int. Agrophysics* 17: 169-174.

NOM -021-RECNAT-2000. Especificaciones sobre fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. *DOF* 23/09/2002.

Oades, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.

Ortiz, S. C. A. y Gutiérrez, C. M. del C. 2001. La Etnoedafología en México Una visión retrospectiva. *Etnobiología* 1:44-62.

Ortiz S., C. A., Gutiérrez C., Ma del C. y Sánchez G., P. 2014. Levantamientos de suelos para dar recomendaciones a nivel parcelario. Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados. Texcoco, México. 16 p.

Page, A. L., A.C. Chang. 1981. Trace metal in soils and plants receiving municipal wastewater irrigation. In: Municipal wastewater in agriculture. F.M. D'Itrí, J.A. Martínez and M. Athié L. (eds). Academic Press, Inc. N. Y. USA.

Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V. and Toro, L. 2004. Sequential Extraction of Heavy Metals in River Sediments of an Abandoned Pyrite Mining Area: Pollution Detection and Affinity Series. *Environmental Pollution*, 132:189-201

PlataformaSas.Planet.Release.151111.ziphttps://bitbucket.org/sas_team/sas.planet.bin/downloads/

Porta, C.J., R.M. López-Acevedo y L.C. Roquero. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 880 pp.

Prieto, M.J., González R.C., Román G.A., Prieto G.F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10(1): 29-44.

Ramírez-Fuentes E., Lucho-Constantino C., Escamilla-Silva, E., Dendooven L. 2002. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. *Bioresource Technology* 85: 179–187

Ringrose-Voase, A.J. and Bullock, P., 1984. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *J. Soil Sci.*35: 673-684. RingroseVoase, A.J. 1996. Measurement of soil macropore geometry by image analysis of sections through impregnated soil. *Plant and Soil* 183: 27-47.

Sánchez-Guzmán, P., C. A. Ortiz-Solorio, Ma. del C. Gutiérrez-Castorena y J. D. Gómez-D. 2002. Clasificación campesina de tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz. *Terra Latinoamericana* 20: 359-369.

SEDESOL/INE. 1993. Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente: 1991-1992. México.

Segura Castruita, Miguel A., Gutiérrez C., Ma. del Carmen, Ortiz S., Carlos A., Gómez D., David J. Suelos arcillosos de la zona oriente del Estado de México.

Siegrist R.L. and Boyle C.W. 1987. Wastewater-Induced Soil Clogging Development. *J. Environ. Eng.* 113(3): 550-566

Soil Survey Staff. 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos. 12^a. Edición. Traducción de C. A. Ortiz – Solorio, Ma del C. Gutiérrez – Castorena y E. V. Gutiérrez – Castorena. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales. Washington, D. C.

Siebe, C., 1994 Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Contaminación Ambiental* 10, 15-21.

Soil Survey Staff. 2014. Claves para la Taxonomía de Suelos. Traducido por Carlos Alberto Ortiz-Solorio, Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena y Edgar V. Gutiérrez-Castorena Decima segunda Edición. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales U.S. 410 pp.

Suarez, D.L. 1981 Relation Between pHc and Sodium Adsorption Ratio (SAR) and an Alternative Method of Estimating SAR of Soil or Drainage Waters. *Soil Sci. Am. J.* 45 469-475.

Sustaita, R.F., V. Ordaz Ch., C. Ortiz S. y F. de León G. 2000. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debidos al uso agrícola. *Agrociencia* 34: 379-386.

Terra Latinoamericana [en línea] 2000, 18 (enero-marzo): [Fecha de consulta: 24 de noviembre de 2017] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57318104>> ISSN

Tisdall, J.M. 1994. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils. *Plant Soil* 159: 115-121.

Thompson, M.L., Singh, P., Corak, S., Straszheim, W.E. 1992. Cautionary notes for the automated analysis of soil pore-spaces images. *Geoderma* 53: 399-415.

Van Reeuwijk, L. P. 2003. Procedimientos para análisis de suelos. Trad. al español por M.C. Gutiérrez C., C. A. Tarez E. y C. A. Ortiz S. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.

Vera, M., Sierra, M., Díez, M., Sierra, C., Martínez A., Martínez F. J. y Aguilar, J. 2007. Deforestation and land use effects on micromorphological and fertility changes in acidic rainforest soil in Venezuelan Andes. *Soil & Tillage Research* 84: 184-194.

Warrick, A.W. 2002. *Soil physics companion*. CRC Press. Boca Ratón, Florida. 249-295 pp.

Williams, B. J. y Ortiz, S. C. A. 1981. Middle American Folk Soil Taxonomy. *Annals of Association of American Geographers*. 71(3):335-358.

Zamora F.R., Rodríguez G.N., Torres R.D., Yendis C.H.J 2009. Uso de agua residual y contenido de materia orgánica y biomasa microbiana en suelos de la llanura de Coro, Venezuela. *Agricultura Técnica en México*. 35(2):211-218.

ANEXOS

Descripción de Perfiles de Suelo

Perfil #1: Tierra Delgada con Piedra Bajo Rendimiento **Fecha:** 27 / Julio / 2017

Descrito por: Víctor Manuel Justo Segovia

Supervisado por: Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio

Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena

Localidad: Dos cerros **Municipio:** Mixquiahuala de Juárez **Estado:** Hidalgo

Coordenadas: Latitud Norte 20° 15' 20.20" y Longitud Oeste 99° 08' 15.66"

Altitud: 1996 m

Relieve: regular

Pendiente: 3%

Drenaje superficial: sitio normal

Condiciones meteorológicas: Seco.

Régimen de humedad: Ústico

Pedregosidad: 45%

Material Parental: Calizas

Flora: Pirul y Mezquite

Fauna: Víbora cascabel, trompa de puerco, conejo, ardilla y tlacuache.

Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
	Apk	0-15	Color gris muy oscuro (10YR 3/1); ligeramente húmedo; textura arcillosa; estructura de bloques subangulares y granular; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; presencia de poros, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces abundantes y gruesas; con un porcentaje de piedra del 10% reacción fuerte al HCl y H ₂ O ₂ ; transición media y horizontal.
	BAk	15-25	Color negro (10YR 2/1); húmedo; textura arcillosa; estructura de bloques subangulares; consistencia ligeramente duro; permeabilidad moderada; poros abundantes, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; pocas raíces y gruesas; con un porcentaje de pedregosidad del 35% reacción fuerte al HCl y H ₂ O ₂ ; transición tenue y horizontal.
	BAk ₂	25-40	Color negro (10YR 2/1); húmedo; textura arcillosa; estructura de bloques subangulares; consistencia dura; permeabilidad moderada; pocos poros, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; con un porcentaje de pedregosidad del 50% reacción fuerte al HCl y H ₂ O ₂ ; transición abrupta y horizontal.
	Ckm	40-70	Laminar

Análisis químicos y físicos del perfil: Tierra Delgada Con Piedra Bajo Rendimiento.

Prof. (cm)	pH	CO	CE	MO	N	P	CIC	Ca	Mg	Na	K
0-15	7.4	2.41	1.19	4.15	0.26	19.02	17.27	21.64	1.60	3.85	3.12
15-25	7.8	2.64	0.78	4.55	0.20	2.81	20.76	18.48	1.72	3.63	1.98
25-40	7.8	2.72	0.80	4.68	0.25	16.47	21.53	24.55	1.60	4.28	2.36

pH= Potencial Hidrógeno; CO=Carbono Orgánico (%); CE=Conductividad Eléctrica (dSm⁻¹); MO=Materia Orgánica (%); N=Nitrógeno (%); P=Fósforo (ppm); CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico (Cmol(+) Kg⁻¹); Ca=Calcio (Cmol(+) Kg⁻¹); Mg=Magnesio (Cmol(+) Kg⁻¹); Na=Sodio (Cmol(+) Kg⁻¹); K=Potasio (Cmol(+) Kg⁻¹);

Prof. (cm)	Dap	CaCO ₃	% A	% L	% R	Clase textural	Color
0-15	1.46	6.06	22.31	38.22	39.47	Arcilla	10 YR 3/1
15-25	1.11	6.06	19.28	33.71	34.89	Arcilla	10 YR 2/1
25-40	1.06	21.43	34.68	32.01	33.31	Arcilla	10 YR 2/1

Dap=Densidad Aparente (g.cm³); %CaCO₃=Carbonatos de Calcio (%); %A=Porcentaje de Arena, %L=Porcentaje de Limo; %R=Porcentaje de Arcilla.

Perfil #2: Tierra Delgada con Piedra Alto Rendimiento

Descrito por: Víctor Manuel Justo Segovia

Supervisado por: Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio

Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena

Localidad: Dos cerros **Municipio:** Mixquiahuala de Juárez **Estado:** Hidalgo

Coordenadas: Latitud Norte 20° 15' 21.35" y Longitud Oeste 99° 07' 43.97"

Altitud: 1992 m

Relieve: regular

Pendiente: 4%

Drenaje superficial: sitio normal

Condiciones meteorológicas: Húmedo.

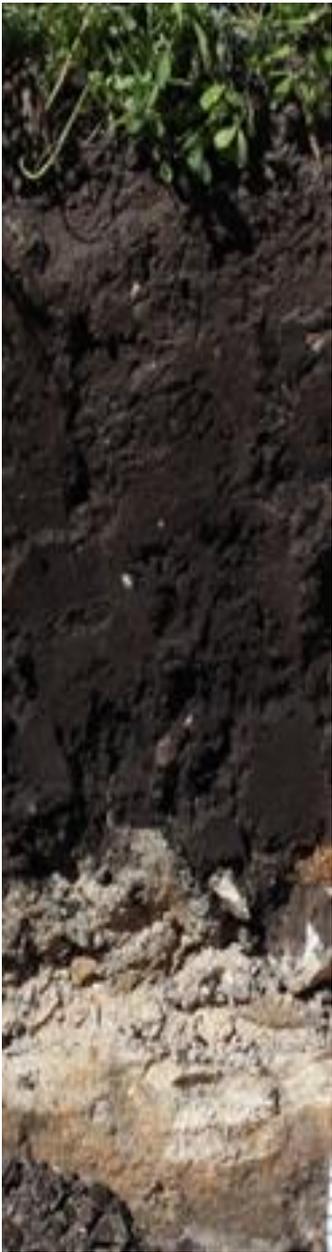
Régimen de humedad: Ústico

Pedregosidad: 20%

Material Parental: Calizas

Flora: Pirul

Fauna: Trompa de puerco, conejo, ardilla, rata de campo.

Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
	Ap	0-15	<p>Color gris muy oscuro (10YR 3/1); húmedo; textura arcillosa; estructura de bloques subangulares; consistencia ligeramente duro; permeabilidad muy rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces abundantes y gruesas; con un porcentaje de pedregosidad del 3% reacción fuerte al HCl y H₂O₂; transición media y horizontal.</p>
	Ck	15-50	<p>Color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); húmedo; textura arcillosa; estructura de bloques subangulares; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces abundantes y gruesas; reacción fuerte al HCl y H₂O₂; transición abrupta y ondulada.</p>
	Ckm	50-70	Laminar

Análisis químicos y físicos del perfil: Tierra Delgada Con Piedra Bajo Rendimiento.

Prof. (cm)	pH	CO	CE	MO	N	P	CIC	Ca	Mg	Na	K
0-15	7.7	1.57	1.16	2.70	0.17	18.42	26.00	47.37	34.24	7.54	5.40
15-50	7.7	1.95	1.08	3.36	0.14	20.14	27.16	13.12	1.61	4.72	2.74

pH= Potencial Hidrógeno; CE=Conductividad Eléctrica (dSm^{-1}); CO=Carbono Orgánico (%); MO=Materia Orgánica (%); N=Nitrógeno (%); P=Fósforo (ppm); CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); Ca=Calcio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); Mg=Magnesio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); Na=Sodio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); K=Potasio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$);

Prof. (cm)	Dap	CaCO ₃	% A	% L	% R	Clase textural	Color
0-15	1.06	2.38	14.65	38.74	46.60	Arcilla	10 YR 3/1
15-50	1.58	1.95	18.24	34.97	46.80	Arcilla	10 YR 3/2

Dap=Densidad Aparente (g.cm^3); %CaCO₃=Carbonatos de Calcio (%); %A=Porcentaje de Arena, %L=Porcentaje de Limo; %R=Porcentaje de Arcilla,

Perfil #3: Tierra Delgada Sin Piedra Bajo Rendimiento

Descrito por: Víctor Manuel Justo Segovia

Supervisado por: Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio

Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena

Localidad: 4ta Demarcación **Municipio:** Francisco I. Madero **Estado:** Hidalgo

Coordenadas: Latitud Norte 20° 15' 03.44" y Longitud Oeste 99° 05' 26.49"

Altitud: 1982 m

Relieve: regular

Pendiente: 2%

Drenaje superficial: Sitio normal

Condiciones meteorológicas: Seco.

Régimen de humedad: Údico

Pedregosidad: 0%

Material Parental: Calizas

Flora: Pirul y Mezquite

Fauna: Víbora casera, trompa de puerco, conejo, ardilla, rata de campo.

Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
	Ap	0-20	<p>Color gris oscuro (10YR 4/1); ligeramente húmedo; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción muy fuerte al HCl y fuerte al H₂O₂; transición media y horizontal.</p>
	BA	20-40	<p>Color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); ligeramente húmedo; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción muy fuerte al HCl y fuerte al H₂O₂; transición media y horizontal.</p>

B	40-60	<p>Color pardo oscuro (10YR 3/3); ligeramente húmedo; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción muy fuerte al HCl y fuerte al H₂O₂; transición media y horizontal.</p>
Bk	60-85	<p>Color pardo oscuro (10YR 3/3); ligeramente húmedo; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción muy fuerte al HCl y fuerte al H₂O₂</p>

Análisis químicos y físicos del perfil: Tierra Delgada Sin Piedra Bajo Rendimiento

Prof. (cm)	pH	CO	CE	MO	N	P	CIC	Ca	Mg	Na	K
0-20	7.1	2.87	1.34	4.94	0.45	5.51	37.83	24.52	16.18	4.94	5.27
20-40	7.5	4.55	1.05	7.85	0.37	7.89	25.41	44.27	32.64	5.15	6.42
40-60	7.8	0.73	0.70	1.25	0.18	15.90	34.92	13.89	19.52	3.63	4.51
60-85	7.7	0.96	0.76	1.65	0.08	16.38	36.39	19.02	15.51	3.99	4.16

pH= Potencial Hidrógeno; CE=Conductividad Eléctrica (dSm^{-1}); CO=Carbono Orgánico (%); MO=Materia Orgánica (%); N=Nitrógeno (%); P=Fósforo (ppm); CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); Ca=Calcio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); Mg=Magnesio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); Na=Sodio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); K=Potasio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$);

Prof. (cm)	Dap	CaCO ₃	% A	% L	% R	Clase textural	Color
0-20	1.35	17.32	11.68	47.07	41.26	Arcillo Limoso	10 YR 4/1
20-40	1.33	18.61	8.27	48.88	42.85	Arcillo Limoso	10 YR 3/2
40-60	1.39	16.45	6.47	41.87	51.66	Arcillo Limoso	10 YR 3/3
60-85	1.37	12.99	11.39	46.94	41.67	Arcillo Limoso	10 YR 3/3

Dap=Densidad Aparente (g.cm^3); %CaCO₃=Carbonatos de Calcio (%); %A=Porcentaje de Arena, %L=Porcentaje de Limo; %R=Porcentaje de Arcilla.

Perfil #4: Tierra Delgada Sin Piedra Alto Rendimiento

Descrito por: Víctor Manuel Justo Segovia

Supervisado por: Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio

Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena

Localidad: 4ta Demarcación **Municipio:** Francisco I. Madero **Estado:** Hidalgo

Coordenadas: Latitud Norte 20° 15' 07.020" y Longitud Oeste 99° 05' 23.46"

Altitud: 1984 m

Relieve: regular

Pendiente: 3%

Drenaje superficial: Sitio normal

Condiciones meteorológicas: Seco.

Régimen de humedad: Údico

Pedregosidad: 0%

Material Parental: Calizas

Flora: Pirul

Fauna: Víbora casera, trompa de puerco, conejo, ardilla, rata de campo.

Perfil	Horizonte	Prof. (cm)	Descripción
	Ap	0-15	<p>Color gris oscuro (10YR 4/1); ligeramente húmedo; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción fuerte al HCl y al H₂O₂; transición media y horizontal.</p>
	2Bkw ₁	15-25	<p>Color gris muy oscuro (10YR 3/1); húmedo; textura arcillo limoso; estructura de bloques subangulares de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad moderada; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados intersticiales y tubulares; raíces raras y gruesas; reacción fuerte al HCl y muy fuerte al H₂O₂; transición media y horizontal.</p>
	2Bw ₂	25-55	<p>Color gris muy oscuro (10YR 3/1); húmedo; textura arcillo limoso; estructura de bloques</p>

subangulares de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad moderada; poros pocos, medianos, continuos, fuera de los agregados, intersticiales; raíces raras y medias; reacción fuerte al HCl y muy fuerte al H₂O₂; transición abrupta y horizontal.

Color negro (10YR 2/1); húmedo; textura arcillo limoso; estructura de bloques subangulares de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad moderada; poros pocos, medianos, continuos, fuera de los agregados, intersticiales; raíces raras y medias; reacción muy fuerte al HCl y H₂O₂; transición media y horizontal.

3Bw₃ 55-60

Color pardo muy oscuro (10YR 2/2); húmedo; textura arcillo limoso; estructura bloques subangulares; consistencia duro; permeabilidad lenta; poros pocos, finos, continuos, dentro de los agregados, intersticiales; raíces muy raras y medias; reacción muy fuerte al HCl y H₂O₂.

3Bw₄ 60-75

Análisis químicos y físicos del perfil: Tierra Delgada Sin Piedra Alto Rendimiento

Prof. (cm)	pH	CO	CE	MO	N	P	CIC	Ca	Mg	Na	K
0-15	7.6	3.33	1.02	5.74	0.29	2.07	25.80	44.26	1.66	4.50	3.50
15-25	7.4	2.72	0.91	4.68	0.28	2.25	36.28	26.99	1.62	4.28	3.50
25-55	7.8	3.10	0.71	5.34	0.18	2.45	34.92	21.29	1.76	4.07	2.99
55-60	7.7	2.72	0.82	4.68	0.17	2.74	37.83	12.85	1.71	3.85	2.61
60-75	7.7	1.11	0.69	1.91	0.15	19.90	34.73	11.13	1.67	3.63	2.36

pH= Potencial Hidrógeno; CE=Conductividad Eléctrica (dSm^{-1}); CO=Carbono Orgánico (%); MO=Materia Orgánica (%); N=Nitrógeno (%); P=Fósforo (ppm); CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); Ca=Calcio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); Mg=Magnesio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); Na=Sodio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$); K=Potasio ($\text{Cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$);

Prof. (cm)	Dap	CaCO ₃	% A	% L	% R	Clase textural	Color
0-15	1.29	18.18	11.32	40.26	48.42	Arcillo Limoso	10 YR 4/1
15-25	1.48	19.48	11.01	43.95	45.04	Arcillo Limoso	10 YR 3/1
25-55	1.45	21.65	11.46	40.40	48.15	Arcillo Limoso	10 YR 3/1
55-60	1.00	19.26	11.37	42.57	46.06	Arcillo Limoso	10 YR 2/1
60-75	1.22	17.53	4.86	50.27	44.86	Arcillo Limoso	10 YR 2/2

Dap=Densidad Aparente (g.cm^3); %CaCO₃=Carbonatos de Calcio (%); %A=Porcentaje de Arena, %L=Porcentaje de Limo; %R=Porcentaje de Arcilla.

Perfil #5: Tierra Gruesa

Descrito por: Víctor Manuel Justo Segovia

Supervisado por: Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio

Dra. Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena

Localidad: San Juan Tepa **Municipio:** Francisco I. Madero **Estado:** Hidalgo

Coordenadas: Latitud Norte 20° 13' 59.42" y Longitud Oeste 99° 05' 19.70"

Altitud: 1991 m

Relieve: regular

Pendiente: 5%

Drenaje superficial: Sitio normal

Condiciones meteorológicas: Seco.

Régimen de humedad: Údico

Pedregosidad: 0%

Material Parental: Calizas

Flora: Pirul y Casuarinas.

Fauna: Víbora cascabel, zorrillo, conejo, ardilla, rata de campo, tlacuache.



^Ap 0-10. Color pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2); ligeramente húmedo; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción nula al HCl y muy fuerte al H₂O₂; transición ligera y horizontal.

^Bw 10-20

Color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); ligeramente húmedo; textura arcillosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción nula al HCl y muy fuerte al H₂O₂; transición ligera y horizontal.

^Bw 20-30

Color pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2); ligeramente húmedo; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos,

		<p>medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción nula al HCl y muy fuerte al H₂O₂; transición ligera y horizontal.</p>
2Ab	30-70	<p>Color pardo muy oscuro (10YR 2/2); ligeramente húmedo; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción nula al HCl y muy fuerte al H₂O₂; transición ligera y horizontal.</p>
Bw	70-90	<p>Color pardo muy oscuro (10YR 2/2); ligeramente húmedo; textura arcillo limosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción fuerte al HCl y H₂O₂; transición ligera y horizontal.</p>
Bk	90-102	<p>Color pardo pálido (10YR 6/3); ligeramente húmedo; textura</p>

arcillosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción fuerte al HCl y H₂O₂; transición abrupta y ondulada.

Bk2

102-120

Color pardo (10YR 4/3); ligeramente húmedo; textura arcillosa; estructura de bloques subangulares y granular media de moderado desarrollo; consistencia ligeramente duro; permeabilidad rápida; poros pocos, medianos, continuos, dentro y fuera de los agregados, intersticiales y tubulares; raíces pocas y gruesas; reacción muy fuerte al HCl y fuerte al H₂O₂.

Análisis químicos y físicos del perfil: Tierra Gruesa

Prof. (cm)	pH	CO	CE	MO	N	P	CIC	Ca	Mg	Na	K
0-10	6.9	1.42	1.59	2.44	0.21	2.59	40.16	22.28	17.26	6.24	4.89
10-20	7.1	1.80	0.81	3.10	0.19	18.75	41.13	15.41	19.19	4.94	4.00
20-30	7.2	1.03	0.36	1.78	0.13	19.42	27.16	23.29	16.33	6.67	6.03
30-70	7.6	1.03	0.60	1.78	0.10	20.38	20.18	16.37	16.01	4.50	2.48
70-90	7.5	0.34	0.69	0.59	0.07	2.75	39.14	14.12	15.35	4.10	1.69
90-102	7.9	0.50	0.96	0.86	0.04	3.16	36.28	23.50	17.26	8.19	4.26
102-120	8	0.65	1.00	1.12	0.06	23.56	34.53	20.55	16.06	7.54	2.36

pH= Potencial Hidrógeno; CE=Conductividad Eléctrica (dSm^{-1}); CO=Carbono Orgánico (%); MO=Materia Orgánica (%); N=Nitrógeno (%); P=Fósforo (ppm); CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico ($Cmol(+) Kg^{-1}$); Ca=Calcio ($Cmol(+) Kg^{-1}$); Mg=Magnesio ($Cmol(+) Kg^{-1}$); Na=Sodio ($Cmol(+) Kg^{-1}$); K=Potasio ($Cmol(+) Kg^{-1}$);

Prof. (cm)	Dap	CaCO ₃	% A	% L	% R	Clase textural	Color
0-10	1.39	0.38	3.08	46.81	50.11	Arcillo Limoso	10 YR 4/2
10-20	1.49	0.22	2.44	40.47	57.10	Arcilla	10 YR 3/2
20-30	1.55	0.29	1.71	46.29	52.00	Arcillo Limoso	10 YR 3/2
30-70	1.31	0.74	7.07	52.14	40.78	Arcillo Limoso	10 YR 2/2
70-90	1.30	0.80	10.45	47.44	42.11	Arcillo Limoso	10 YR 2/2
90-102	1.37	0.49	8.02	40.73	34.46	Arcilla	10 YR 6/3
102-120	1.29	1.10	24.21	39.73	36.06	Arcilla	10 YR 4/3

Dap=Densidad Aparente ($g.cm^3$); %CaCO₃=Carbonatos de Calcio (%); %A=Porcentaje de Arena, %L=Porcentaje de Limo; %R=Porcentaje de Arcilla.