



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE QUIMICA

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TITULO:

INDICADORES DE CALIDAD AMBIENTAL EN SUELOS ÁCIDOS

TESIS

Que para obtener el título de:

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

Presenta:

Biól. Enrique Cruz Chávez

Director de tesis:

DR.OTILIO ARTURO ACEVEDO SANDOVAL

Mineral de la Reforma, Mayo de 2010.

*Pensar es el trabajo más difícil que existe. Quizá esa sea la razón por la que
haya tan pocas personas que lo practiquen.*
Henry Ford

Sin sacrificio... no hay victoria.
Anónimo

EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FUE POSIBLE AL PROYECTO CONACYT 53235 “SESQUIOXIDOS DE HIERRO Y ALUMINO EN SUELOS FORESTALES” DE APOYO COMPLEMENTARIO A INVESTIGADORES EN PROCESO DE CONSOLIDACIÓN.

EL AUTOR DEL PRESENTE TRABAJO AGRADECE AL CONACYT POR LA BECA DE ESTUDIOS DE POSGRADO NACIONAL NÚMERO 216391 OTORGADA EN LA FASE FINAL DE ESTE TRABAJO.

LOS TOPICOS CONTENIDOS EN LA PRESENTE TESIS SE PRESENTARON EN LOS SIGUIENTES EVENTOS:

8^o CONGRESO INTERNACIONAL, 14^o NACIONAL DE CIENCIAS AMBIENTALES Y 3^{ER} CONGRESO DE MEDIO AMBIENTE. DEL 1 AL 5 DE JUNIO DE 2009. SANTA CRUZ, TLAXCALA, MÉXICO.

TRABAJO (PRESENTACION ORAL): RESUMEN MEMORIAS

ÍNDICES DE CALIDAD AMBIENTAL EN SUELOS ÁCIDOS

PARTICIPANTES:

Enrique Cruz-Chávez^{1,2}, Otilio A. Acevedo Sandoval², Misael E. Cruz Sánchez² Alberto J. Gordillo-Martínez³, Francisco Prieto-García³, Cesar Maycotte-Morales⁴.

PRIMER FORO ESTUDIANTIL “JOVENES EN EL DESARROLLO DE LA CIENCIA UAEH-2009” 26 DE AGOSTO, PACHUCA DE SOTO, HIDALGO, MÉXICO.

TRABAJO (CAPITULO DE LIBRO):

CORRELACIÓN DE ÍNDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO EN LA PORCIÓN SURESTE DEL ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO.

Enrique CRUZ-CHAVEZ, Otilio A. ACEVEDO-SANDOVAL, Misael E. Cruz-Sánchez, Francisco PRIETO-GARCIA³, José A. GORDILLO-MARTINEZ, Cesar MAYCOTTE-MORALES

TRABAJO (CAPITULO DE LIBRO): ENVIADO PARA SU PUBLICACIÓN

LIBRO: “CIENCIAS AMBIENTALES. TEMÁTICAS PARA EL DESARROLLO. VOLUMEN IV”

TRABAJO (ARTICULO):

ÍNDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO EN LA PORCIÓN SURESTE DEL ESTADO DE HIDALGO, MÉXICO.

Enrique CRUZ-CHAVEZ, Otilio A. ACEVEDO-SANDOVAL, Francisco PRIETO-GARCIA, Cesar MAYCOTTE-MORALES.

Dedicatorias

A la memoria de mi madre Inocencia Chávez Juárez (†), por ser ejemplo de lucha y amor.

A mi padre Enrique Cruz Montiel (Don Quique) por ser ejemplo de trabajo y rectitud, porque sin cuestionar mis ideales he recibido siempre el apoyo incondicional.

A mis Hermanos Griselda (Doña Gris), Fernando (Sr. Cenando) y Ángel (Mi querido Negrito), por crecer juntos y todo el amor recibido, los quiero mucho!.

A mí cuñado Raymundo y a mis sobrinos Sandra, Ángel y Adriancito; por compartir y permitirme ser parte de la familia y a ellos verlos crecer y recordarles que no existen límites más los que uno se establece.

A ti Chabela por tener la suerte conocerte y compartir el tiempo contigo.

A todos mis muertos, a los amigos que se adelantaron Chava (†), Jarocho (†).

AGRADECIMIENTOS

Resulta difícil comenzar en escribir una lista de agradecimientos con la incertidumbre de que, por la mala memoria de quien la redacta y por la enorme cantidad de personas que han ayudado a la realización de esta tesis, muchos serán los nombres que debieran aparecer inscritos en esta lista, no lo estarán. A todos estos colaboradores, que permanecerán en el anonimato a pesar de mi buena voluntad, pero no muy buena memoria quisiera pedirles disculpas y manifestarles mi silencioso agradecimiento.

A todos los que han confiado en mi persona, a los que aun sin cuestionar la forma de pensar, los ideales que persigo y forma de ser, a ellos mis más sinceros agradecimientos.

A mi asesor, Dr. Otilio A. Acevedo Sandoval por permitirme formar parte del que en aquel entonces fuera el Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la UAEH, por sus enseñanzas y sobre todo por su calidad humana y en su asesoramiento desde el primer momento en que me adoptó como su colaborador y ahora como tesista, por ser un gran amigo. ¡Gracias Doc.!

A ti Aydee Acosta Tolentino porque a pesar de todo sigues tan cerca de mí.

Al M. en C. Misael E. Cruz Sánchez, por las charlas interminables, por sus consejos siempre atinados, por ser un buen compañero y amigo.

A mis sinodales: Dr. Alberto José Gordillo, Dr. Francisco Prieto y Dr. Cesar Maycotte por su contribución y valiosas observaciones durante el desarrollo de este trabajo, por su paciencia, comprensión y apoyo en los momentos álgidos de la tesis.

Al M. en C. Octavio Castillo Acosta, por el ánimo y cordialidad que siempre imprime en sus comentarios, por la comprensión en la inexperiencia en el periodo como Jefe del Área Académica de Ciencias de la Tierra y facilidades otorgadas para la realización de estudios Doctorales.

Dr. Antelmo Vargas Blancas, Magdalena Flores (Male), Química Cliseria Sánchez y Sra. Irmita por ser parte de mi historia dentro de la Universidad, desde mi llegada a la fecha, por compartir risas y aguantar mis malos ratos, gracias.

A las amigas de toda la vida, Anabell, Aide, Lulú y Yazmin, , gracias por su invaluable amistad y apoyo.

A mis amigas y compañeras del posgrado (mis queridísimas rémoras): Chely por ser gran amiga, porque nosotros le imprimimos la calidad y después de las caídas?... no pasa nada; a Rose Richards, por sumarse a la causa y compartir las risas con ambos. Gracias por los buenos momentos! y porque el show debe continuar...

A mis amigos y amigas del Nido, compañeros, alumnos y todos los que han formado parte en algún momento del laboratorio de Minerales No metálicos y Recursos Asociados ó como diría Doña Martha... esos los asociados.....: Misael, Peter, Quím. Clis, Dr. Otilio, Oscarin, Dulce Jeanette, Marlene, Pablin, Gabino, Pilar, Carlos, Memo, Abigail, Iracema, Anallely, Fabriccio, Ingrid, y Xochitl, por los momentos de convivencia....y por los que nos faltan.

A la UAEH y al ICBI, por permitirme seguir creciendo.

ÍNDICE

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	viii
JUSTIFICACIÓN	ix
CAPÍTULO 1. ALUMINIO Y ACIDEZ	
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Comienzos de la teoría del aluminio	1
1.1.2. Medición de pH y arcillas de aluminio	2
1.1.3. El aluminio y la importancia de su estudio	3
1.2. Características físico-químicas del aluminio	5
1.2.1. Especiación del aluminio en solución acuosa	5
1.2.2. Química del aluminio y pH	6
1.2.3. Tipos de acidez en el suelo	8
1.2.3.1. Acidez activa.	8
1.2.3.2. Acidez intercambiable	8
1.2.3.3. Acidez titulable o potencial	9
1.2.3.4. Acidez total	9
CAPÍTULO 2. EL SUELO COMO RECEPTOR	
2. EL SUELO Y SU RELACION CON EL MEDIO AMBIENTE	11
2.1. La función del suelo	11
2.2. Su relación con el medio ambiente	13
2.3. Propiedades físico-químicas de los suelos.	15
2.3.1. Capacidad de intercambio catiónico de los suelos	15
2.4. La materia orgánica del suelo	17
2.4.1. Descomposición de la materia orgánica	18
2.5. Reacción del suelo (pH)	19
2.6. Bases intercambiables: Ca ⁺⁺ , Mg ⁺⁺ , K ⁺ y Na ⁺	20

2.6.1. El calcio en los suelos	20
2.6.2. El magnesio en los suelos	21
2.6.2.1. Relación Ca/Mg	21
2.6.2.2. Función del calcio y del magnesio en el suelo	22
2.6.3. El potasio en los suelos	23
2.6.3.1. Relación del potasio con las plantas	24
2.6.3.2. El sodio en los suelos	24
CAPÍTULO 3. ÍNDICES E INDICADORES DE CALIDAD	
3. ANTECEDENTES	25
3.1. Foros de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable	25
3.2. Indicadores Ambientales en el Marco Global	27
3.3. Concepto de calidad de suelo	28
3.4. Indicadores de Calidad Ambiental en Suelos	35
3.5. Indicadores para la estimación de la calidad del suelo	41
3.6. Importancia de los indicadores ambientales	46
CAPÍTULO 4. SELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE INDICADORES	
4. Antecedentes	46
4.1. Modelo Presión -Estado –Respuesta	46
4.2. Formulación de Indicadores de Calidad Ambiental Locales (suelos de la porción sureste).	47
CAPÍTULO 5. OBJETIVOS	
5.1. OBJETIVO GENERAL	51
5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	51
CAPÍTULO 6. DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO Y METODOLOGIA	
6. Localización y características del área de muestreo	52
6.1. Localización y vías de comunicación	52
6.2. Clima, temperatura y precipitación	54
6.3. Escenario ecológico	54
6.4. Geología regional	55
6.4.1. Geología del área de estudio	56
6.4.2. Clima y tipo de vegetación	58
6.5. Características de muestreo y recolección de muestras en la zona de	

estudio	59
6.6. Análisis Químico del Suelo	63
6.6.1. Caracterización química	63
6.6.2. Extracción química selectiva	63
6.7. Formulación de índices de calidad ambiental locales	64
6.8. Patrones de meteorización diagramas A-CN-K	64
CAPÍTULO 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
7.1. Propiedades químicas de los suelos estudiados.	65
7.1.1. % Materia Orgánica	65
7.1.2. Capacidad de intercambio cationico	68
7.1.3. % Carbono Orgánico	69
7.1.4. Bases intercambiables y % saturación de bases.	70
7.2. Propiedades químicas de perfiles de suelo	72
7.3. Índices de calidad de suelos	76
7.3.1. Clasificación de muestras de acuerdo a su calidad.	79
7.4. Patrones de meteorización diagramas A-CN-K	80
7.5. Diagramas de distribución de isoconcentraciones	86
CONCLUSIONES	90
REFERENCIAS	92
ANEXOS	102

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1.	Clasificación de la acidez intercambiable en el suelo.	8
Tabla 3.1.	Rangos de escala de tiempo para diferentes propiedades del suelo (Cruz <i>et al.</i> , 2003).	39
Tabla 3.2.	Indicadores físicos, químicos y biológicos para evaluar la condición, calidad y salud del suelo (Doran y Parkin, 1996).	44
Tabla 4.1.	Indicadores propuestos en el modelo PER para evaluar el recurso suelo (SEMARNAT, 2005b).	46
Tabla 4.2.	Indicadores de calidad, unidades, valores mínimos (I_{min}) y máximos (I_{max}) definidos para la porción suroeste del estado de Hidalgo, Municipio de Acaxochitlán.	48
Tabla 4.3.	Clasificación de calidad de suelos para la porción sureste del estado de Hidalgo.	50
Tabla 6.1.	Coordenadas en UTM (Universal Transversa de Mercator-Proyección) de los puntos de muestreo.	61
Tabla 7.1.	Propiedades químicas de suelos de la porción sureste del estado de Hidalgo.	67
Tabla 7.2.	Propiedades químicas de suelos 1 y 2 de la porción sureste del estado de Hidalgo.	74
Tabla 7.3.	Propiedades químicas de perfiles suelos 3 y 4 de la porción sureste del estado de Hidalgo.	75
Tabla 7.4.	Estandarización de indicadores seleccionados para valores $V_{n=1}$ y $V_{n=0}$ de I_{max} y I_{min} ., de % Corg., Sat. Bases, % de M.O.	77
Tabla 7.5.	Estandarización de indicadores seleccionados para valores $V_{n=1}$ y $V_{n=0}$ de I_{max} y I_{min} ., de pH H_2O y CIC.	78
Tabla 7.6.	Índices de Calidad de Suelo y clasificación en base a los	79

critérios generados.

Tabla 7.7.	Valores reportados para basalto y corteza terrestre superior.	81
Tabla 7.8.	Valores de CIA (índice de Alteración Química) de los perfiles de suelo.	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 6.1.	Mapa de localización de la porción sureste del estado, Municipio de Acaxochitlán, Hidalgo.	52
Figura 6.2.	Vías de acceso.	53
Figura 6.3.	Escenario ecológico de los suelos del Acaxochitlán, estado de Hidalgo.	55
Figura 6.4.	Mapa geológico del área de estudio. Porción de la carta geológica F14D83.	57
Figura 6.5.	Vegetación predominante <i>Pinus patula</i> , <i>Quercus spp</i> , <i>Pinus teocote</i> y relieve de lomeríos de altas pendientes.	58
Figura.6.6.	Recorridos de campo y verificación de sitios de muestreo en base a estudio de cartografía.	59
Figura.6.7.	Muestreo de suelos superficiales (0-20 cm.) de la zona de estudio Acaxochitlan, Hgo.	60
Figura 6.8.	Posicionamiento de puntos de muestreo.	60
Figura 6.9.	Distribución altitudinal de perfiles escavados en la porción suroeste del estado de Hidalgo	62
Figura. 7.1.	a) % Materia orgánica y b) valores de pH en KCl para 14 muestras procesadas en la zona de estudio.	66
Figura. 7.2.	a) Capacidad de Intercambio Cationico para 14 muestras procesadas en la zona de estudio.	68
Figura. 7.3.	Distribución de valores de Corg. para 14 muestras procesadas en la zona de estudio.	69
Figura. 7.4.	Distribución de valores de potasio (K), calcio (Ca), magnesio(Mg) y sodio (Na) para 14 muestras procesadas en la zona de estudio.	71
Figura. 7.5.	Distribución de valores de % de saturación de bases para	71

	14 muestras procesadas en la zona de estudio.	
Figura. 7.6.	Distribución de Índices de calidad de suelos generados a partir de la normalización y ponderación de las variables seleccionadas; de 14 muestras procesadas en la zona de estudio.	76
Figura. 7.7.	Frecuencia de Índices de calidad de suelos de 14 muestras procesadas en la zona de estudio.	79
Figura 7.8.	Diagrama ternario A-CK-N de intemperismo químico Nesbitt y Young (1984, 1989), mostrando los valores de CIA para muestras del perfil 1	82
Figura 7.9.	Diagrama ternario A-CK-N de intemperismo químico Nesbitt y Young (1984, 1989), mostrando los valores de CIA para muestras del perfil 2	83
Figura 7.10.	Diagrama ternario A-CK-N de intemperismo químico Nesbitt y Young (1984, 1989), mostrando los valores de CIA para muestras del perfil 3.	84
Figura 7.11.	Diagrama ternario A-CK-N de intemperismo químico Nesbitt y Young (1984, 1989), mostrando los valores de CIA para muestras del perfil 4.	85
Figuras 7.12.	Grafico de isoconcentración de pH y Carbono Orgánico.	87
Figuras 13.	Grafico de isoconcentración de Potasio y % de Materia Orgánica.	88
Figuras 7.14.	Grafico de isoconcentración de Mg y Calcio.	89

RESUMEN

La formulación de indicadores de calidad ambiental en la última década se refleja en la necesidad de diagnóstico actual de los ecosistemas y como una necesidad para proporcionar a los tomadores de decisiones y al público en general una herramienta mediante la cual se presente información concisa y sustentada científicamente, de tal manera que pueda ser entendida y usada fácilmente.

Se determinaron las propiedades químicas de suelos de la porción sureste del estado de Hidalgo, así como las fracciones de aluminio, hierro y silicio bajo extracción química selectiva en suelos superficiales (0-30 cm.), y en 4 perfiles de suelo, dentro de la porción sureste del estado de Hidalgo. Tomando estos como base para la identificación y selección de indicadores de calidad ambiental en suelos ácidos, para la construcción de un índice local. Se desarrollaron mapas de distribución e isoconcentración de elementos y propiedades, como herramientas para identificar zonas de manejo y recuperación en base a la vocación natural de los suelos de la zona de estudio.

JUSTIFICACIÓN

El estado de Hidalgo presenta una gran diversidad de ecosistemas naturales, agropecuarios y silvoforestales. La planificación del desarrollo sostenible de nuestra sociedad, necesita basarse en un conocimiento profundo y actualizado de las capacidades, características y resiliencia de los citados escenarios.

En la porción sureste del estado de Hidalgo, la práctica agrícola es la principal actividad de la cual recibe ingresos económicos la población. Buena parte de esta actividad se califica como agricultura de temporal con baja tecnificación. La evaluación de la calidad de los suelos y de su modificación en base a su vocación natural forestal y de cambio a agricultura, puede proporcionar una idea cercana a la sostenibilidad del manejo aplicado a tal recurso.

De igual manera al valorarse el suelo, como integrante fundamental de los ecosistemas naturales y agro ecosistemas, en función de los servicios ambientales que brinda, como regulador del ciclo hidrológico, como parte de biodiversidad, o como sumidero de CO₂, entre otros.

El presente trabajo doctoral pretende contribuir a la valoración desde un enfoque de calidad ambiental a los suelos ácidos de la porción sureste del estado de Hidalgo, México.

CAPITULO 1

ALUMINIO Y ACIDEZ

1. ANTECEDENTES

1.1. *Comienzos de la teoría del aluminio.*

Anteriormente se consideraba que la parte anionica del suelo, orgánica e inorgánica, consistía de materiales con propiedades típicas de los ácidos débiles.

Esta teoría fue aceptada universalmente sobre todo en base a las investigaciones de Branfield (1923); en los cuales propuso que los suelos ácidos son aquellos cuyo complejo de cambio se encuentra saturado en un grado mayor o menor con iones de hidrogeno, basada que estos iones de hidrogeno se disociaban en un grado pequeño pero variable, dando de esta manera una concentración de hidrogeno cuya medición era representada por el pH del suelo. Asumiendo que todas las investigaciones parecían indicar que las arcillas y el complejo de cambio de los suelo forman un grupo algo particular de ácidos débiles cuyas cargas negativas son neutralizadas por iones de hidrogeno y por cationes de cambio como potasio, calcio, magnesio, etc. Donde parecía que esta teoría explicaba en su totalidad las observaciones experimentales referentes a la acidez del suelo.

En Inglaterra y en la India varios grupos de investigadores como Paver y Marshal, Schofield y Muckerjee, propusieron en sus trabajos que en adición al hidrogeno, el aluminio y el hierro son de gran importancia en la contribución de la acidez del suelos. Siendo estas conclusiones apoyadas por algunos investigadores rusos de la década.

A base de acumulación de evidencia en contra de la teoría dominante, se despertó el interés en problemas de acides de suelos en los Estados Unidos de América, y varios grupos de investigadores, especialmente por Coleman y McLean

y colaboradores de ambos, comenzando a estudiar el problema de la acidez del suelos de manera más crítica.

1.1.2 Medición de pH y arcillas de aluminio

Pokras (1956), estableció la importancia principal de las arcillas y estableció de manera general el por qué de la medición del pH en el suelo, describiendo el fenómeno de la siguiente manera:

Explico que de manera similar a muchos metales de mediana electronegatividad el hidróxido de aluminio es poco dissociable. Al mismo tiempo, el ion aluminio hexahidratado que se forma al disolverse, forma compuestos de este metal en agua siendo ionizado en forma similar a un ácido débil. Esta disociación, que rinde gran parte de los hidrógenos medidos en una determinación de pH de suelo, es más evidente en suspensión de suelo que en soluciones acuosas. Su alcance regulado por un equilibrio químico similar al de la disociación de ácidos débiles, que al ser valorados, tres hidrógenos son los que se disocian por cada uno de los aluminios hexahidratados y permiten de esta manera una determinación volumétrica de aluminio en suelos. (Bornemiza, 1965).

Otro fenómeno que es de importancia en la química del aluminio en suelo, es la polimerización que presentan sus cationes hidratados (Pokras, 1956). Este proceso contribuye a los hidrógenos en solución presentes y a la fijación de aluminio en forma no intercambiable en los suelos. Es probable que reduce la disponibilidad de aluminio a las plantas, siendo una explicación probable del porque es menor la concentración tóxica del aluminio para las plantas en soluciones nutritivas que en suelos. De igual manera Schofield (1939), observo que la presencia de sulfato en los suelos aumenta la toxicidad del aluminio presente, lo que puede ser causado por la inhibición de formación de complejos en presencia de sulfato.

1.1.3. El aluminio y la importancia de su estudio

El aluminio es el metal más abundante y el tercer elemento en abundancia en la corteza terrestre, donde compone aproximadamente el 8% en peso. El químico danés Hans Christian Oersted aisló el aluminio por primera vez en 1825, por medio de un proceso químico que utilizaba una amalgama de potasio y cloruro de aluminio. Entre 1827 y 1845, el químico alemán Friedrich Wöhler fue el primero en medir la densidad del aluminio y demostrar su ligereza, y en la exposición de París de 1855 exhibió el aluminio puro (Massot *et al.* 1991).

En la naturaleza, el aluminio se encuentra solamente en forma oxidada. En solución acuosa el ión hidroliza las moléculas de agua formando hidróxidos.

Ya en 1918, este metal se había relacionado con diferentes procesos patológicos importantes, tanto en el hombre como en otros grupos de animales (Haug, 1984). El aluminio ha sido implicado en numerosos estudios como agente neurotóxico, provocando la degeneración de fibrillas nerviosas, lo cual ha sido observado en zonas del cerebro donde la concentración de aluminio era muy elevada.

También se ha relacionado al Aluminio con enfermedades como el Alzheimer y Parkinson (Crapper-McLachlan, 1986).

También a principios de siglo se comenzó a estudiar el aluminio en relación a su fitotoxicidad. El estudio de esta relación, últimamente ha cobrado gran importancia debido a dos importantes razones: en primer lugar porque diversos metales, entre ellos el aluminio, se han descrito como fuertes limitadores del crecimiento de las plantas provocando, por tanto, fuertes pérdidas económicas (Foy *et al.*, 1978, Poscherieder *et al.*, 1992), y en segundo lugar, porque los vegetales como productores primarios son la vía de entrada a la cadena alimentaría para el hombre, tanto directamente como a través de la carne de los herbívoros que éste consume.

El aluminio, considerado ya uno de los más fuertes reductores del crecimiento vegetal en suelos ácidos (Foy *et al.*, 1978), incrementa mucho su

disponibilidad en zonas de pH por debajo de 5, o bien en suelos orgánicos con un pH próximo a 7 (Hargrove, 1986). Así, el pH del suelo es uno de los factores más importantes que determinan la disponibilidad del metal. Ciertas estimaciones indican que un 40% del terreno cultivable del planeta y quizá un 70% del suelo utilizado para la producción de alimentos, son zonas ácidas y, por tanto, sujetas a la toxicidad por este metal (Haung, 1984). En zonas ácidas, el aluminio es uno de los factores más importantes que determinan las especies de plantas y su distribución.

Existen zonas del planeta que presentan de forma natural un pH ácido como las zonas tropicales y subtropicales. En nuestro país correspondería a las regiones del norte de la península. Esta situación se puede ver agravada por la manipulación antropogénica, como el uso de fertilizantes y acidificantes o la utilización de fuentes de energía fósil como el carbón y el petróleo que liberan una gran cantidad de NO_x y SO_2 , los cuales, en presencia de sustancias oxidantes, dan lugar a ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3). Estos dos ácidos determinan la acidificación tanto del agua (el pH del agua de lluvia en equilibrio con el CO_2 del aire se halla alrededor de 5.8), como del suelo. Como consecuencia hay una mayor disponibilidad para la planta de aluminio y otros metales que pueden resultar tóxicos. Una de las expresiones de esta acidificación es la muerte de los bosques provocada por la llamada lluvia ácida que aqueja a grandes extensiones básicamente de coníferas de Estados Unidos, Canadá y Europa. Estudios realizados por Mohen en diferentes zonas de los Estados Unidos arrojan unos valores de pH de la lluvia alrededor de 3.6 (Mohen, 1988). Actualmente hay datos experimentales que indican una mayor complejidad del fenómeno, causado probablemente por una acción conjunta de contaminación atmosférica, ácidos de la lluvia y factores climatológicos (Poschenrieder y Barceló, 1985).

Añadido a los problemas anteriormente expuestos, hay que tener en cuenta que al mismo tiempo que aumenta la disponibilidad de ciertos elementos al disminuir el pH, disminuye la de otros que son esenciales para el desarrollo de la planta, como pueden ser Mg y Ca (Poschenrieder., 1992).

1.2. Características físico-químicas del aluminio.

El aluminio es un elemento sólido en condiciones normales, de color blanco plateado, dúctil y muy maleable. Cristaliza en forma cúbica.

Lo podemos encontrar libre o combinado en la naturaleza. Es un metal trivalente, pertenece al grupo III A del tercer periodo de la tabla periódica y tiene un peso atómico de 25.98 y un número atómico de 13. Debido a su baja densidad (2.699 g.cm^{-3} a 20°C), no se incluye en el grupo de los metales pesados.

Su baja electronegatividad hace que sea un potente reductor, capaz de reducir a un gran número de óxidos metálicos además del agua, el CO_2 y el CO (Martín, 1988).

Para aumentar la dureza de este elemento, normalmente se utilizan aleaciones con otros metales, tales como el Cu, Si, Mg y Zn, las cuales tienen numerosas aplicaciones industriales.

La química del aluminio es bastante compleja. Debido a su alta carga iónica y su pequeño radio atómico, es capaz de reaccionar con otros metales que se encuentran en el suelo en forma soluble, y se han descrito una larga variedad de quelaciones y reacciones de hidrólisis.

1.2.1 Especiación del aluminio en solución acuosa

El aluminio se encuentra en forma de Al (III) altamente hidratado en solución acuosa.

Las soluciones acuosas de las sales de aluminio son ácidas debido a la hidrólisis del Al. Este ión de poco volumen y mucha carga, ejerce un fuerte campo eléctrico que atrae a los electrones, alejándolos de las moléculas de agua vecinas que se convierten en dadoras de protones (Martín, 1988).

Es un ión altamente hidratado que se comporta como un metal duro con una considerable afinidad por bases fuertes y grupos cargados negativamente (RO^- $\text{>C}_6\text{H}_5\text{O}^-$ >>COO^-). Esta afinidad, que se da en grupos bien conocidos como efectivos agentes quelantes para el Al (III) y otros metales trivalentes (Fe^{3+} , Ga^{3+} , In^{3+}), se pueden clasificar por orden decreciente según su afinidad al aluminio como glicoles, catecoles, hidroxiaácidos alifáticos e hidroxiaácidos aromáticos. Otros agentes quelantes para este tipo de metales trivalentes y que contiene estos grupos son el ácido cítrico, tartárico, glucónico, etc. Una importante consideración para definir a estos efectivos ligandos donadores es la competencia con hidrogeniones en solución acuosa, ya que sufren constantes protonaciones. Se considera, pues, que los más efectivos son los compuestos que contienen grupos hidroxil o fenil. También se han descrito compuestos inorgánicos capaces de quelar el aluminio como los grupos fluorhídrico y sulfato.

En general, y a pesar de que las formas queladas del aluminio se han considerado como formas no tóxicas para el aluminio, no existe un acuerdo unánime sobre este punto.

1.2.2. Química del aluminio y pH

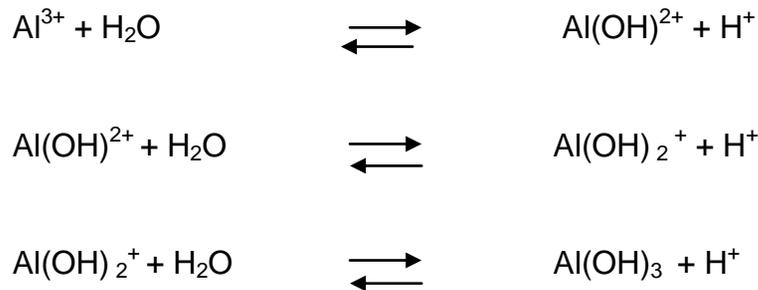
La fuerte tendencia del aluminio a formar formas hidrolíticas y la elevada insolubilidad del $\text{Al}(\text{OH})_3$, presentan grandes interferencias para medir las constantes de estabilidad de los complejos Al (III).

El aluminio es un elemento anfótero que puede actuar como catión $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})^{3+}$ en medio ácido y como anión en medio básico. El punto de pH al cual se da la variación es 5. Cuando el pH es inferior a 5 el ión se encuentra mayoritariamente en forma de complejo hexahidrato octaédrico. Cuando disminuye el pH las cargas de protones van disminuyendo y las cargas positivas del aluminio fuerzan la hidrólisis de las moléculas de H_2O .

En estudios en los que se determinan la forma del aluminio predominante a cada valor de pH se observa que cuando se encuentra en medio ácido, el aluminio se presenta en forma iónica (Al^{3+}), o bien en forma de monómero, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$.

A valores entre 3.5-5.0 aumentan mucho los polímeros de hidróxidos de aluminio llegando a una concentración máxima. Cuando el pH es superior a 5, tanto las formas monoméricas como los polímeros de hidróxidos disminuyen mucho e incrementan los niveles de hidróxidos de aluminio altamente básicos que son muy insolubles y precipitan fácilmente por lo que son muy poco disponibles para la planta, y por tanto, no tienen mucho efecto sobre ésta.

Las reacciones que encontramos son las siguientes:



A pH neutro el aluminio se encuentra en forma insoluble $\text{Al}(\text{OH})_3$ (gibbsite).

Según Wagatsuma y Kiyuda (1987), las formas iónicas polimerizadas son las mejor absorbidas por las plantas. Plantas tratadas como polímeros de aluminio presentaron los síntomas típicos de toxicidad por aluminio, mientras que los tratamientos con aluminio en forma monoméricas y $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, no se reconoció ningún síntoma característico de la toxicidad por aluminio.

La toxicidad por el aluminio difiere marcadamente con la forma química del aluminio con la que trabajemos. La toxicidad más acusada por Al se ha visto que se produce a valores de pH bajos, donde predominan las formas poliméricas de hidróxidos de aluminio. De todas formas, el margen de pH donde podemos detectar la máxima toxicidad por aluminio depende tanto de las especies con la que trabajemos como con la variedad empleada.

1.2.3. Tipos de acidez en el suelo

En el suelo se distinguen varios tipos de acidez, dependiendo de los iones que la producen, los cuales requieren diferentes métodos para cuantificarlas.

1.2.3.1. Acidez activa

Es la acidez que se evalúa cuando se mide el pH del suelo; es la que está determinando las condiciones de acidez actual del suelo e involucra los iones H_3O^+ disociados en la solución de éste.

1.2.3.2. Acidez intercambiable

Es la acidez que está asociada al Al_3^+ , $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y al $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ y se establece determinando la cantidad de aluminio intercambiable que tiene el suelo al lavarlo con una solución de KCl 1N; este tipo de acidez es la más importante en suelos que tienen $\text{pH} < 5.5$, ya que a partir de este valor empieza a aumentar la solubilidad del aluminio, en forma exponencial.

Para interpretar esta propiedad también se requiere conocer la especie vegetal que se pretende cultivar, no todas las plantas toleran las mismas cantidades de aluminio en el suelo; para evaluar el estado de la acidez intercambiable en el suelo, Sánchez y Salinas (1983) citados por Jaramillo (2002) han propuesto utilizar la saturación con aluminio intercambiable con los siguientes niveles críticos generales (Cuadro 1.1), aunque cabe repetir que cuando se conoce la planta que se quiere tener, para la interpretación debe conocerse su susceptibilidad a la saturación propuesta:

Tabla 1.1- Clasificación de la acidez intercambiable en el suelo.

Nivel de saturación con aluminio intercambiable	Valor de la saturación (%)
BAJO	< 40
MEDIO	40 - 60
ALTO	60 - 80
MUY ALTO	> 80

1.2.3.3. *Acidez titulable o potencial*

Espinosa (1995) la define como la acidez dependiente del pH que se extrae con $\text{BaCl}_2\text{-TEA}$ a pH de 8.2. Es muy alta porque incluye H_3O^+ no intercambiable proveniente de la materia orgánica (fenol y carboxilo) y de sesquióxidos hidratados de Fe y Al.

1.2.3.4. *Acidez total*

Comprende la sumatoria de la acidez intercambiable más la acidez titulable; tanto este tipo de acidez como la titulable no tienen ninguna importancia práctica en el manejo de suelos.

A finales de los años 50's la creencia general era que el hidrógeno era el catión dominante en los suelos ácidos. Sin embargo, varios trabajos demostraron que el ion aluminio Al^{3+} y no el H^+ era el catión dominante en la mayoría de los suelos con pH menor de 5. En los más de los casos, el desarrollo de los cultivos en los suelos ácidos puede relacionarse directamente con la saturación de aluminio o con la concentración de aluminio en la solución del suelo. Hasta cierto punto, una elevada concentración de H^+ (o bajo pH) no influye directamente por sí misma en el desarrollo de los cultivos. Las concentraciones elevadas de H^+ en la solución del suelo, sin embargo, favorecen la meteorización de los minerales del suelo, lo que origina la liberación de Al^{3+} y la lixiviación de iones tales como potasio, magnesio, calcio y manganeso. Los suelos contienen también pequeñas cantidades de hierro, manganeso y zinc intercambiables que, aunque en menor grado, son causantes de la acidez al aceptar iones OH^- para pasar a compuestos insolubles. El comportamiento del aluminio es el que condiciona las características de los suelos ácidos. La concentración de Al en la solución del suelo es generalmente menor de 1ppm, al incrementarse este valor, el Al en la solución del suelo aumenta claramente, lo cual se traduce en toxicidad del Al, incluso de las plantas que toleran el Al (H. R. Von Huexkull, 1990).

La acidez de los suelos afecta de una forma muy particular y determinante algunas de las características químicas y biológicas del suelo, pues en general, reduce el crecimiento de las plantas, ocasiona la disminución de la disponibilidad

de algunos de los nutrimentos como Ca, Mg, K y P, y favorece la solubilización de elementos tóxicos para las plantas como Al y el Mn presentes en la sedes de intercambio y en la solución (Molina, 1998).

Núñez (1985) concluyo que a nivel nacional se cuenta con 13'128, 300 ha de suelos ácidos, lo que representa 6.69% del territorio nacional; sin embargo para 1999 se estimo que el 15% de los suelos del país se encuentra afectado por procesos de acidificación (SEMARNAP/INEGI, 1999), de donde resulta evidente que a nivel nacional en el transcurso de 14 años se presentó un incremento de acidez en un 8% aproximadamente. Hidalgo no queda fuera de este problema, se estima que el 14% de ha superficie agrícola (140,000 ha aproximadamente) presentan este inconveniente (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2001), que puede incrementarse hasta 300,000.00 ha si se consideran las áreas forestales del estado.

CAPITULO 2

EL SUELO COMO RECEPTOR

2. EL SUELO Y SU RELACION CON EL MEDIO AMBIENTE

2.1. La función del suelo.

El suelo realiza un gran número de funciones tanto ambientales como económicas, sociales y culturales que son esenciales para la vida (SEMARNAT, 2005a; Várallyay, 2006).

Tiene diversas funciones dentro del medio ambiente, para Doran y Parkin (1994), las más importantes son: a) como medio de producción biológica y vegetal; b) como filtro para disminuir los efectos de los diferentes contaminantes y patógenos, y c) como promotor de la salud animal y vegetal e, indirectamente, de la salud humana.

Por otro lado Warkentin (1995), indica las funciones del suelo en los ecosistemas son:

- El reciclamiento de los materiales orgánicos para liberar nutrientes y la síntesis posterior de nuevos materiales;
- La distribución de la precipitación;
- El mantenimiento de la diversidad en el hábitat de poros y superficies de diferente tamaño y de las presiones relativas de gases y del agua;
- El mantenimiento de la estabilidad del hábitat, incluyendo una estructura estable y la resistencia a la erosión hídrica y eólica y la regulación del hábitat contra cambios bruscos de temperatura, humedad y concentración de materiales potencialmente tóxicos;
- Almacenamiento y liberación gradual de nutrientes y agua; y

- Distribución de energía en la superficie, lo cual es importante en procesos de circulación globales.

Cabe señalar que los suelos del mundo desempeñan una importante función en la regulación de las concentraciones de los gases en la atmósfera. Son el depósito terrestre más importante de carbono (C), estimado en cerca de 1550 Pg y realizan un papel fundamental en el ciclo global de este elemento; de acuerdo a Batjes (1999), en los ecosistemas terrestres se depositan anualmente cerca de 1-2 Pg de carbono.

Además de los C, los suelos también contienen cerca de 95 Tg de N. Las cantidades atmosféricas de C y N (en la forma de CO₂, CH₄ y NO_x) se incrementan, mientras que las cantidades de C y N en los suelos disminuyen. La cantidad del suelo es importante en la regulación de los flujos gaseosos de los procesos relacionados con el suelo (Bezdicsek *et al.*, 1996).

Otro papel fundamental que juega el suelo en el medio ambiente es como regulador de contaminantes en los ecosistemas, además considera al suelo como una interfase entre el medio ambiente y el impacto de las actividades humanas. El flujo del agua y la erosión llevan consigo contaminantes de la superficie de la tierra a los ríos y ecosistemas marinos acuáticos; los aerosoles que también son fuente de contaminantes se depositan en el suelo. En estos casos actúa como un medio a través del cual los contaminantes se precipitan, absorben e inmovilizan, también se llevan a cabo reacciones que reducen la toxicidad potencial de los contaminantes y su biodisponibilidad a través de la biota de este recurso (Logan, 2000).

Para Blum (2006), el suelo es un proveedor de bienestar y servicios para el hombre y el medio ambiente, tales como: biomasa para alimentos, forraje y energía renovable, es un filtro, un medio amortiguador para limpiar el agua superficial y el aire, además de sustrato de carbono, así como también un medio para mantener una gran variedad de organismos que garantizan la biodiversidad.

2.2. Su relación con el medio ambiente.

En contraste, al relacionar el suelo con el medio ambiente puede ser una arma peligrosa cuando emite gases traza a la atmósfera, lo que contribuye al cambio climático, incluso los contaminantes que contiene se pueden transportar a través del agua superficial, o bien las partículas que los conforman pueden ser transportadas al aire debido a los efectos erosivos del viento y el agua, afectando directamente la salud humana por ingestión, inhalación y el contacto con la piel.

Várallyay (2006) considera que algunas de las funciones del suelo en relación con el medio ambiente son: la de ser un reactor, transformador e integrador de otros recursos naturales (radiación solar, atmósfera, agua superficial y subterránea, recursos biológicos; medio para la producción de biomasa, alimento, forraje, materia prima industrial; almacén de calor, agua, nutrientes para las plantas y en algunos casos almacén de desechos provenientes de diversas fuentes. Por otro lado, también se considera un recurso natural con alta capacidad amortiguadora, lo cual puede prevenir o moderar consecuencias desfavorables en el medio ambiente y/o efectos adversos inducidos por el hombre; siendo un filtro natural, actúa como desintoxicante de sistemas naturales; es un reservorio significativo de genes; lo que lo convierte en un elemento importante en la conservación de la biodiversidad, etc. Vállaray (2006) enfatiza que la multifuncionalidad del suelo depende de sus propiedades, **entre ellas su calidad**.

El suelo es la capa superior de la corteza terrestre que sirve de soporte y sustento a la mayor parte de las actividades antrópicas. Este medio se comporta como un sistema abierto y dinámico, en el tiempo y en el espacio, a través del cual se producen y regulan diferentes flujos de materias y energías. La combinación de sus propiedades físicas, químicas y biológicas permite el desarrollo de sus funciones básicas, señaladas por Blum (1990). Así, el suelo representa un medio físico para el soporte de la actividad humana y es, a su vez, medio histórico debido al registro de procesos pasados; ejerce de hábitat biológico y sirve de sustento para el crecimiento de numerosas especies; el suelo es fuente de materias primas necesarias para el hombre y actúa como productor de biomasa; y, finalmente, el

medio edáfico presenta una función reguladora que influye en el intercambio de componentes con la atmósfera, la hidrosfera, la litosfera y la biosfera.

Este último punto, cabe destacar, que la función de regulación se produce gracias a procesos como la amortiguación, la filtración y la transformación de sustancias y energías, de tal manera, que el substrato edáfico puede almacenar o transportar nutrientes y/o contaminantes a través de mecanismos internos como el intercambio catiónico, la adsorción específica, la quelación, la precipitación, la inmovilización por organismos del suelo o las reacciones de óxido-reducción, entre otros (Lindsay, 1979; Álvarez, 1985; McBride, 1989; McLean y Bledsoe, 1992; Ross, 1994a; Ross, 1994b; Cala, 1998; Martínez y Motto, 2000; McLaughlin ., 2000). Debido a esta función reguladora, el suelo ha sido considerado tradicionalmente como un sumidero de todo tipo de sustancias (Davies, 1980).

La capacidad amortiguadora del suelo no es ilimitada, sino que depende de las propiedades físico-químicas de las sustancias almacenadas, de las propiedades y características edáficas y de las condiciones ambientales imperantes en el medio (Felipó y Garau, 1987; Ritchie y Sposito, 1995; Ge *et al.*, 2000). Dependiendo de estos factores, los efectos perjudiciales que pueden originar las sustancias almacenadas en el suelo pueden ser más o menos intensos, y manifestarse a corto o largo plazo. En cualquier caso, cuando se supera la capacidad amortiguadora del suelo, éste puede dejar de ser eficaz como sistema depurador y comportarse como fuente de sustancias tóxicas, pudiendo entonces desencadenar efectos perjudiciales sobre la salud humana y el medio ambiente (Nriagu, 1990; Macías, 1993; Oliver, 1997).

Entre la gran variedad de sustancias que pueden acumularse en el medio edáfico y producir efectos tóxicos, se presenta el aluminio y la acidez provocada por este centro de atención del presente trabajo.

El suelo se concibe como el medio ideal para el establecimiento de plantas y como cuerpo natural independiente donde existe continuo intercambio de materia y energía al estar compuesto por sólidos como la materia orgánica y los minerales, así como líquidos y gases que actúan en su superficie. El cuidado que históricamente ha recibido el suelo, ha dado pauta a la degradación del mismo y a

una serie de alteraciones que con llevan al decremento de sus propiedades y por ende la productividad de los mismos.

La degradación de los suelos actualmente se ha centrado en los mecanismos de remediación y diagnósticos de pérdida de fertilidad de los suelos, contaminación de metales pesados, salinización y la acidificación, este último factor limita la producción de los cultivos ocasionando no solo esta afectación, si no la movilización de aluminio a suelos y mantos acuíferos, así como la inmovilización de fosforo y absorción de metales tóxicos por las plantas, todos ellos que influyen en la calidad del suelo. (Acevedo, 2001).

Los atributos y/o propiedades que corresponden a un suelo de calidad, según la apreciación de los agricultores y algunos autores como Seybold *et al.*, (1997), corresponden mas al funcionamiento del suelo (producción), que a parámetros cuantitativos. La estimación de la calidad de los suelos en forma descriptiva por los agricultores se basa en parámetros cualitativos prácticos (rendimiento en los cultivos y recuperación) la valoración y monitoreo de la calidad tanto por productores como por investigadores directamente en el campo se basa en la apreciación, descripción caracterizando sus suelos de manera particular. (Harris & Bezdicek, 1994 y Ortiz, 1999).

2.3. Propiedades químicas de los suelos.

2.3.1. Capacidad de intercambio catiónico de los suelos

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es una propiedad físico-química muy importante del suelo porque es un indicador de la fertilidad de éste, y que los suelos con alta CIC ($> \text{meq.g}^{-1}$) representan una reserva o depósito de nutrimentos que pueden cederse a la solución del suelo a medida que son consumidos por las plantas.

Muchos de los componentes de la fase sólida del suelo retienen moléculas o iones en forma más o menos permanente. Algunos de estos procesos son reversibles, y los diferentes iones se retienen en cantidades aproximadamente equivalentes.

La capacidad de intercambio catiónico del suelo es propiciada, principalmente, por sus coloides orgánicos (humus) e inorgánicos (arcillas). Estas pequeñísimas partículas exponen una superficie de de 40 a 800 m² por gramo, debido a los cuales son las porciones más activas del suelo, tanto física como químicamente.

Los coloides presentan cargas no neutralizadas que generan una carga negativa neta, la cual atrae cationes a su superficie, quedando éstos adsorbidos en estos sitios por fuerzas que pueden ser electrostáticas, de Van Der Waals o químicas. Cuando las fuerzas que intervienen son predominantemente electrostáticas, los procesos son más o menos reversibles y se les designa como cambio iónico, debido a que además de la adsorción de un ion se libera una cantidad equivalente de otro. Cuando la unión se debe a la fuerza de Van Der Waals, se tiene una adsorción física y no hay necesidad de liberar iones.

El intercambio catiónico se lleva a cabo en arcillas, alofano y humus así como en las raíces de las plantas.

Los cationes intercambiables pueden ser iones de H⁺ o cationes metálicos, de los cuales los más importantes son Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ y K⁺; otros cationes que son retenidos en menor cantidad son; NH⁺, Mn⁺⁺, Cu⁺⁺, Zn⁺⁺; el Al⁺⁺⁺ es abundante en los suelos ácidos. Es útil recordar que los cationes intercambiables se hallan en equilibrio con los cationes en solución, y constituyen una fuente importante de nutrimentos para las plantas.

En general, la capacidad de intercambio catiónico se refiere a la carga iónica total del complejo de cambio (materia orgánica y arcillas) activo en la adsorción de iones. Sin embargo, cuando se habla de la capacidad de intercambio catiónico se puntualiza en la cantidad total de cationes que un suelo puede adsorber por unidad de peso.

La capacidad de intercambio catiónico se mide en mili equivalentes por cien gramos de suelo (meq.100g⁻¹) u otro material adsorbente como la arcilla.

Es conveniente hacer la aclaración de que la Sociedad de la Ciencia del Suelo de América adoptó recientemente modificaciones del sistema métrico de unidades del Sistema Internacional de Unidades, entre las cuales están los equivalentes que actualmente son considerados mol de carga iónica y la capacidad de intercambio catiónico, que ahora se expresa como moles (+) kg^{-1} ($\text{moles} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Los suelos difieren en la capacidad de adsorción de iones; cuanto más alto sea el contenido de arcilla y de humus en un suelo, mayor será la capacidad de intercambio. Los suelos arenosos tienen, en general entre $0\text{-}5 \text{ meq} \cdot 100\text{g}^{-1}$ de capacidad de intercambio total (CICT), mientras que un migajón arenoso tiene entre 5 y 10, un migajón arcilloso entre 15 y 20, y los suelos arcillosos exceden de $30 \text{ meq} \cdot 100\text{g}^{-1}$ de CICT.

No todos los cationes liberados por procesos de intemperismo y por descomposición de la materia orgánica tienen igual poder de reemplazo en el complejo coloidal. La fuerza de adsorción de un catión depende de su radio iónico, su carga y su grado de hidratación.

2.4. La materia orgánica del suelo.

La formación y la acumulación de materia orgánica son procesos de gran importancia en la edafogénesis.

La materia orgánica (MO) contenida en un suelo es un indicador de su nivel de fertilidad natural. Constituye una reserva de nutrimentos que son liberados en forma gradual por medio del proceso de la mineralización. Entre estos nutrimentos destacan el nitrógeno, el fósforo y el azufre, así como otros elementos esenciales menores que las plantas necesitan para su crecimiento y desarrollo.

La materia orgánica tiene gran influencia en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En relación con las primeras, la MO favorece la retención de cationes debido a su elevada capacidad de intercambio catiónico, con

lo cual se evita la pérdida de nutrimentos o de fertilizantes por lavado; la MO actúa además como agente quelante y como buffer.

Por otra parte, los compuestos de carbono provenientes de la MO son fuente de energía para los organismos del suelo, cuya cantidad y diversidad están en función de los niveles de MO presentes.

El porcentaje de MO en el suelo depende de distintos factores del medio; los más importantes son el clima y la vegetación. Del clima depende la cantidad de luz, calor y agua, mientras que la vegetación juega un papel fundamental en la formación de humus y mantiene una estrecha relación con el clima, aunque aparece como factor ecológico subordinado a éste, ya que es el clima el que define las grandes zonas de vegetación de suelos.

El aporte de MO al suelo puede ser de origen animal o vegetal. Se compone básicamente de carbohidratos: azúcares, almidones, celulosa y hemicelulosa; proteínas y aminoácidos; ligninas, taninos y en menor porcentaje grasas, aceites, ceras y resinas.

2.4.1. Descomposición de la materia orgánica.

Los organismos que participan en la descomposición de la MO son heterótrofos y aeróbicos, emplean el carbono de los compuestos orgánicos para obtener energía y sintetizar tejido nuevo.

La descomposición de MO implica la oxidación del carbono por diferentes organismos, sobre todo microscópicos (hongos, bacterias y actinomicetos) que requieren de éste y otros nutrimentos para obtener energía y emplearla en su metabolismo.

El principal proceso en la descomposición de la MO se da por medio de la respiración, debido a que se realiza la oxidación de compuestos de carbono a $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

2.5. *Reacción del suelo (pH).*

La reacción del suelo es el concepto relativo a las reacciones de acidez y basicidad que ocurren en los edafosistemas y agroecosistemas. Constituye una propiedad que afecta la intemperización de minerales, la formación de arcillas, la descomposición de la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes, entre otros procesos del suelo.

Además, constituye un factor que puede limitar o propiciar algunas reacciones bioquímicas y, por lo tanto, influir de manera cualitativa y cuantitativa en la biota del suelo.

Para la formación de la acidez o la basicidad del suelo se emplea el concepto pH del suelo, el cual fue introducido por Sorensen en 1999 y se define como:

$$\text{pH} = \log 1/A_{\text{H}^+} = -\log A_{\text{H}^+}$$

donde A_{H^+} es la actividad de iones hidrógeno.

Sin embargo, en lugar de actividad con frecuencia es más conveniente usar concentración de iones H^+ .

$$\text{pH} = \log 1/[\text{H}^+] = -\log [\text{H}^+]$$

Los ácidos orgánicos e inorgánicos producidos por la descomposición de la materia orgánica son los constituyentes del suelo que pueden afectar la acidez de éste. El CO_2 , producto de la respiración de las raíces de las plantas, produce H_2CO_3 en la solución del suelo. El agua es también una pequeña fuente de iones H^+ .

Por otra parte, una cantidad importante de iones hidrógeno presentes en el suelo es adsorbida por el complejo arcilloso en forma de iones H^+ intercambiables (Tan, 1993).

El valor del pH se utiliza para conocer el grado de acidez, neutralidad y basicidad del suelo. Es una herramienta que permite entender y explicar, en muchos casos, aspectos de la biología y la ecología de especies vegetales y animales, ya que el índice de acidez o basicidad de los suelos determina en buena medida la disponibilidad de nutrientes, su asimilación por parte de las plantas y, como consecuencia, el crecimiento y desarrollo de éstas.

2.6. Bases intercambiables: Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ y Na^+

Estos elementos presentan un amplio ciclo en la naturaleza; en los suelos constituyen una parte importante dentro de la nutrición de las plantas. La corteza terrestre contiene aproximadamente 3.6% de Ca y 2.1% de Mg.

El calcio y el magnesio se encuentran en diferentes rocas ígneas (ácidas, intermedias, básicas y ultrabásicas), en areniscas, en lutitas y, en mayor proporción (en porcentajes de óxidos CaO y MgO), en las calizas. Forman parte de minerales primarios como: augita, plagioclasa, moscovita, biotita, piroxeno y anfíbol.

2.6.1. El calcio en los suelos.

El contenido total de Ca en los suelos no calcáreos y en regiones no áridas se encuentra comúnmente entre 0.1 y 1.2 g.kg^{-1} (Fassbender y Bornemisza, 1987). Se considera que el mineral primario anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) es la fuente más importante de calcio en los suelos no calcáreos. Una fracción considerable de calcio total se encuentra en forma intercambiable. En la mayor parte de los suelos no muy ácidos, el Ca es el catión principal en el complejo de cambio (60-80% de la CIC).

En general, los suelos de regiones húmedas contienen menos calcio que su roca madre. Cuando el lavado es moderado, este catión no sale del perfil sino que se encuentra acumulado como una capa de carbonato de calcio en un horizonte cuya profundidad aumenta con la precipitación. En general, los suelos derivados de calizas son particularmente ricos en este elemento, aun en regiones lluviosas.

En muchos suelos del trópico se encuentra una relación inversa entre el Ca y el Al en el complejo del suelo, donde el Ca es reemplazado por el Al a medida que aumenta la meteorización de los minerales primarios.

2.6.2 El magnesio en los suelos.

El contenido de Mg total en los suelos no calcáreos varía entre 0.1 y 1%. La mayor parte del elemento se encuentra asociada con algunos minerales primarios como la biotita, la augita y la hornblenda, y con algunos secundarios, como la montmorillonita.

Se sabe que entre los silicatos el olivino, la biotita, los piroxenos y los anfíboles muestran contenidos altos de magnesio. Las rocas calcáreas, especialmente las dolomitas, que contienen este elemento como carbonato, se caracterizan por formar suelos hasta con el 2% de Mg total. En los suelos de regiones áridas a veces se presentan acumulaciones de $Mg SO_4$.

Una pequeña parte del Mg se asocia con la materia orgánica del suelo. Una proporción apreciable de Mg en los suelo se encuentra en el complejo de cambio (10-20% de la CIC).

En los suelos ácidos de los trópicos, con frecuencia se requiere la aplicación de este elemento, es especial para cultivos como el cafeto, que tienen altas necesidades de magnesio.

2.6.2.1 Relación Ca/Mg.

Un exceso de Ca^{++} cambiante puede interferir en la asimilación de Mg^{++} y de K^+ . Si la relación Ca/Mg, expresados ambos en meq/100g, es mayor que 10, entonces es posible que se produzca una carencia de Mg. La relación óptima está alrededor de 5 (Guerrero, 1990).

2.6.2.2. Función del calcio y del magnesio en el suelo.

El calcio es un regulador de la estructura y de las características físicas del suelo, formando complejos arcillo-húmicos. Las enmiendas calizas, cuando se hacen en suelos arcillosos, aumentan la permeabilidad al aire y al agua y activan la microbiana.

Otra acción importante del calcio es en la actividad biológica del suelo. Los microbios nitrificadores que transforman el nitrógeno amoniacal (NH^+4) en nítrico (NO^-3) no son activos con el pH del suelo inferior a 6.

Las plantas absorben el calcio y el magnesio en su forma catiónica (Ca^{++} y Mg^{++}). En el interior de las células, ambos participan en distintas funciones y forman parte de constituyentes moleculares. El calcio interviene en la formación de pectatos de calcio de la laminilla media de las células que intervienen en el proceso general de absorción de elementos; forma sales con los ácidos orgánicos e inorgánicos de las plantas, regulando la presión osmótica; interviene en la formación de la lecitina, que es un fosfolípido importante en la permeabilidad de la membrana celular; y participa en la mitosis de las células, en el crecimiento de los meristemas y en la absorción de nitratos.

Por otra parte, el magnesio se encuentra en la clorofila, de la que depende la actividad fotosintética de la planta. Participa en la formación y acumulación de reservas de hidratos de carbono y azúcares, proteínas, vitaminas, etc. También intervienen en la formación de pectatos y forma parte de por lo menos 15 enzimas (sintetizadoras, transforilasas y descarboxilasas), además de participar en la síntesis de aceites vegetales.

Generalmente las deficiencias de calcio no se encuentran con regularidad en los cultivos agrícolas. Un factor importante de esta carencia lo determinan el pH del suelo; así, en suelos muy ácidos el calcio no es fácilmente asimilable.

Los problemas de carencia de magnesio se pueden producir en:

- Suelos ácidos con pH muy bajo.
- Suelos ricos en potasio cambiante, debido a lo que se denomina antagonismo de iones. La relación K/Mg en meq/100g. debe estar comprendida entre 0.2 y 0.3. cuando esta relación es mayor, se puede carecer de Mg, por antagonismo de ion K^+ .
- Suelos ricos en Ca^{++}
- Suelos sódicos.

2.6.3. El potasio en los suelos.

La corteza terrestre contiene aproximadamente 2.5% de K (equivalente a 3.1% de K_2O). El contenido de potasio en los minerales que constituyen las rocas y desde luego, los suelos, es muy variable.

El contenido total de K en los suelos está funcionando con la presencia y la meteorización de feldespatos y micas en los materiales parentales. En los suelos minerales, la mayor cantidad de potasio se encuentra asociada con silicatos en los feldespatos (ortosa u ortoclasa), en las micas (moscovita, leucita y biotita) y en los minerales arcillosos (Illita, vermiculita y glaucomita).

En el suelo, el K se encuentra en diferentes fracciones, las cuales presentan un equilibrio químico con distintas velocidades de reacción; (1) el K estructural, el contenido en los minerales primarios; (2) el K de los minerales secundarios; (3) el K adsorbido, quelatado o acomplexado (en parte en la materia orgánica); (4) el K intercambiable; y (5) el K en la solución del suelo.

El K en la solución del suelo está directamente disponible por la planta, y en condiciones específicas puede ser percolado, lo que en ocasiones genera una pérdida de potasio en el suelo; esta última puede variar entre 5 y 250 kg. K, ha, de acuerdo con las condiciones de contenido de K, de la intensidad de precipitación pluvial y de la cobertura vegetal.

2.6.3.1 Relación del potasio con las plantas.

El potasio es uno de los macro elementos esenciales: disminuye la transpiración de la planta, por lo que la hace más resistente a la sequía; aumenta la resistencia a las heladas al elevar el contenido de la savia en elementos minerales; favorece el desarrollo de las raíces; aumenta la resistencia de los cereales al encamado pues da rigidez a los tejidos; aumenta la resistencia de los vegetales a las enfermedades criptogámicas; interviene en la fotosíntesis, favoreciendo la formación de hidratos de carbono y el movimiento de estos glúcidos hacia los órganos de reserva; también interviene en la síntesis de proteínas y en la estimulación, entre otros.

2.6.3.2. El sodio en los suelos.

El sodio del suelo puede ejercer efectos secundarios importantes en el desarrollo vegetal a través de modificaciones estructurales adversas en el suelo, si el complejo de cambio contiene cantidades apreciables de sodio, el suelo puede dispersarse y volverse lodoso, causando aireación deficiente y baja disponibilidad del agua.

En general, se considera que los suelos son sódicos cuando el catión Na^+ contribuye con un porcentaje igual o superior al 15% de la CIC.

CAPITULO 3

ÍNDICES E INDICADORES DE CALIDAD

3. ANTECEDENTES

3.1 *Foros de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable.*

La cumbre del Río de Janeiro de 1992 puso la primera piedra en el proceso de atajar las consecuencias del cambio climático; previamente fracasaron algunas reuniones en el intento de conseguir una cumbre Oficial de la Tierra. Desde 1992 se produjeron un buen número de encuentros tendientes a alcanzar un acuerdo.

En Estocolmo, Suecia, 1972, se reúnen los gobiernos en la conferencia sobre medio ambiente humano de la ONU con objeto de debatir los problemas ambientales a escala planetaria; los líderes mundiales deciden reunirse cada 10 años para realizar un seguimiento del estado medio ambiental y analizar el impacto que sobre él pueda conllevar el desarrollo. La asamblea acordó determinar los principios básicos sobre problemas medio ambientales, así como la forma de resolverlos y las obligaciones de los Estados e individuos sobre el particular.

En Nairobi, Kenya, 1982, se celebra la conferencia de la ONU, en un intento de que se convierta en la Cumbre Oficial de la Tierra. Las múltiples divergencias, así como la circunstancia de que se reunían en plena guerra fría, hicieron fracasar cualquier acuerdo.

En 1987, en el informe anual de la Comisión Brundtland, se formaliza el concepto de “desarrollo sostenible”. A partir de ese momento se maneja ese término por doquier en todos los ámbitos, desde la propia ONU, pasando por los organismos gubernamentales, internacionales, empresariales, etc.

La cumbre de la Tierra de río de Janeiro, Brasil, de 1992, será recordada como la cumbre internacional de carácter medio ambiental más importante que se haya celebrado nunca. En esa reunión los líderes mundiales adoptaron el plan

conocido como *agenda 21*, un ambicioso programa de acción para el desarrollo sostenible global. Sus grandes áreas de actuación eran básicamente la lucha contra el cambio climático, la protección de la biodiversidad, y la eliminación de las sustancias tóxicas emitidas.

No sería hasta la cumbre de Kyoto de 1997, en que se alcanzarían compromisos concretos y un calendario de actuación. Fue sin duda un gran avance, pues se logró un acuerdo vinculante a todos los países firmantes para que durante el periodo del 2008-2012, se redujeran las emisiones de los 6 gases que más potenciaban el efecto invernadero en un 5.2% con respecto a 1990. Se adoptaba así el primer protocolo que desarrollaba el convenio marco de naciones unidas sobre cambio climático.

A pesar del acuerdo adoptado, el protocolo de Kyoto se presentaba a la vista de los expertos como el inadecuado para conseguir el objetivo deseado, pues los países más desarrollados buscaron métodos legales que evitaran cumplir con las reducciones.

El acuerdo no estuvo exento de durísimas negociaciones, en muchos casos a punto de naufragar por los intereses, principalmente de estados unidos de América, que presiono con más fuerza para poner las condiciones que más favorecieran a sus compañías petroleras. Estados Unidos propuso tener en cuenta determinadas consideraciones ecológicas, tales como que las plantaciones de árbol fueran contabilizadas como sumideros de CO₂, y de esa forma no verse obligados a reducir tanto las emisiones; o también, establecer “derechos de emisión” que previamente fueran comprados a otros países que no llegasen a cubrir su propio cupo, lo que supondría en la práctica que no sólo se reduciría apreciablemente las emisiones sino que podrían incluso llegar a aumentar algo. El protocolo de Kyoto fue un primer paso importante, pero los expertos convienen en que el calendario de aplicación no es satisfactorio, pues debían transcurrir varios años antes de comenzar a reducir las emisiones.

Pero el protocolo de Kyoto tendría sus altas y bajas en los siguientes meses. En Buenos Aires 1998, delegados de 130 países aprobaron un programa que aplazaba hasta el año 2000 la puesta en marcha del acuerdo. Al año siguiente, en la reunión de Bonn de 1999, se pusieron de manifiesto, las grandes diferencias que separaban a los países ricos y pobres; las discusiones que se establecieron cuando se abordó el tema del cambio climático demostraron el gran abismo que existe entre ellos. En la Haya en el año 2000 se recuperan los contactos, pero fracasan de nuevo y se remiten a julio del año 2001, fecha en la que 180 países firman por fin el acuerdo de la puesta en marcha del protocolo de Kyoto aunque con el desmarque de Estados Unidos.

En Noviembre de 2001 en Marrakech, con la iniciativa de la Unión Europea se reúne la séptima conferencia sobre el cambio climático desde Río de Janeiro de 1992, a pesar de que el atentado sobre las torres gemelas de Nueva York estuvo a punto de suspender el encuentro. Finalmente se redactó el texto legal definitivo para su entrada en vigor en el año 2002.

En Johannesburgo, Sudáfrica, entre el 26 de agosto y el 7 de septiembre de 2002, se reúnen los líderes mundiales. Las cosas no han cambiado.

3.2. Indicadores Ambientales en el Marco Global.

A nivel internacional, el desarrollo de indicadores de desempeño ambiental tiene un inicio relativamente alrededor de 1988 – 1989, cuando el “Grupo de los Siete” solicitó a la organización para la cooperación y el desarrollo económico (OCDE) el desarrollo de indicadores ambientales en el contexto de la toma de decisiones, considerando los factores ambientales y económicos (Environment Canadá, 1996).

En México, los primeros pasos para el desarrollo de indicadores ambientales se iniciaron en el Instituto Nacional de Ecología (INE) en 1993, a partir del taller norteamericano de información ambiental, celebrado en octubre de ese mismo año, en la ciudad de México con la participación del Instituto Nacional

de Ecología, Environment Canadá y la Environment Protection Agency (EPA), con el objetivo de generar una base de información para el reporte del estado del ambiente a nivel de América del norte. A pesar de que el establecimiento de indicadores tomó su primer impulso de la necesidad de atender compromisos internacionales y generar indicadores comparables a nivel internacional, con el paso del tiempo y la toma de conciencia de la importancia de estos instrumentos en la planeación y la gestión de las políticas ambientales, se hizo necesario plantear un conjunto de indicadores a nivel nacional que estuvieran enfocados a la toma de decisiones al interior del país, sin excluir desde luego las experiencias internacionales y en la medida de lo posible incluyendo indicadores comparables a nivel internacional.

Los indicadores ambientales, son estadísticas o parámetros que proporcionen información y/o tendencias de las condiciones de los fenómenos ambientales, su significado va más allá de la estadística misma, pretendiendo prever información que permita tener una medida de la efectividad de las políticas ambientales lo que se conoce como “Desempeño Ambiental”. Los indicadores se presentan usualmente en forma de tablas o graficas y se complementan con textos y mapas (propuesta de Indicadores Ambientales, Instituto Nacional de Ecología, Distrito Federal, México, 1997).

3.3. Concepto de calidad de suelo.

Suele utilizarse como sinónimo de calidad del suelo el término salud del suelo (Harris y Bezdicek, 1994). La gente en el campo prefiere utilizar el término salud del suelo y lo caracterizan basándose en descripciones y propiedades cualitativas usando directamente juicio de saludable o no saludable. Por otro lado los científicos prefieren utilizar el término calidad de suelo dando un enfoque analítico en las propiedades cuantitativas y su relacion entre estas y sus funciones (Harris y Bezdicek, 1994; Karlen, 1997).

Harris y Bezdicek (1994) prefieren utilizar el término calidad/salud del suelo y proponen la siguiente definición: el suelo tiene la capacidad de: i) tener una

función resiliente y los diversos ecosistemas que soporta son los correctos; ii) tienen una producción sostenida de diversas plantas y animales, y iii) protege la calidad del medio ambiente sirviendo como interfase para el agua y el aire.

La salud del suelo ha sido descrita como un concepto integral para la agricultura sustentable, aunque este recurso no necesariamente se califica como no saludable cuando no es apto para la agricultura. La salud del suelo puede considerarse para un tiempo particular, de forma equivalente a sus propiedades dinámicas que cambian en corto tiempo, y su calidad se utiliza como una herramienta para un propósito particular en tiempo relativamente largo, de forma equivalente a las propiedades intrínsecas o estáticas del mismo (Singer y Swing, 2000).

Otros autores con otro enfoque tal es el caso de Carter (1997), señala que para describir la calidad del suelo deben utilizarse propiedades químicas, físicas y biológicas. Estos atributos deben ser seleccionados para cada uso específico del suelo. El mismo autor señala que algunos atributos tienen una aplicación amplia, siendo utilizados como indicadores para evaluaciones de calidad de suelo que difieren de su objetivo. Es muy usual en las investigaciones de calidad de suelo que se proponga un conjunto mínimo de datos, atributos clave de amplia significación, aunque en situaciones similares la respuesta dominante del suelo puede describirse de un único atributo. Una de las mayores dificultades de la evaluación de la calidad de suelo radica en el desacuerdo en la estandarización tanto de indicadores como de los límites críticos, las referencias de calidad para realizar comparaciones, metodología de descripción y detección de cambios (Carter, 2002).

Doran (1994), menciona, es común a todas las definiciones la referencia a la capacidad del suelo de dar o proporcionar un servicio de manera efectiva, tanto en el presente como en el futuro. El aspecto de mayor interés consiste en identificar los problemas que afectan a la calidad de los servicios que puede brindarnos en suelo, más allá de la epistemología referente a la conceptualización de la calidad de suelo.

Doran y Parkin (1994), enuncian que la calidad de suelo es:

“La capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites del ecosistema, sosteniendo la productividad biológica, manteniendo la calidad ambiental y promoviendo la salud de plantas y animales”.

En esta definición de calidad del suelo quedan identificados y reconocidos los principales servicios del suelo que fueron reconocidos en la conferencia sobre evaluación y seguimiento de la calidad de suelo realizada en el Rodale Institute en el año 1991(National Reasearch Council América, 1991).

En la definición anterior quedan asentados los siguientes aspectos:

- Productividad, referida a la capacidad del suelo para permitir y facilitar la productividad biológica y vegetal de los ecosistemas.
- Calidad ambiental, referida a la capacidad del suelo para atenuar y amortiguar los efectos de los contaminantes ambientales, de los agentes patógenos y otros efectos adversos de origen externo.
- Salud humana, referida a las interrelaciones entre la salud del suelo, de las plantas, de los animales y del ser humano.

El termino calidad de suelo ha generado diversas opiniones apoyadas en diferentes puntos de vista, Sojka (1993), presenta una perspectiva filosófica de la evolución del concepto de calidad de suelo a través de la cual podemos ver desde que se incorporo éste término en la década de los 70's ha aumentado su uso y ha ganado la aceptación por los científicos (Sojka *et al.*, 1999). En la última década varios son los trabajos tales como Doran, *et al.* 1994, 1996, Karlen, *et al.* 2001, que utilizan diversas metodologías de estudios técnicos para evaluar la calidad de suelo.

Mas sin en cambio Howard (1993) realiza una crítica del concepto de calidad de suelo basada en la percepción y naturaleza de los problemas de calidad de suelo que cada país enfrenta, lo que se refleja en diferentes políticas de protección del recurso suelo en la Unión Europea, asociadas a su vez a la evolución del concepto de calidad de suelo. Para Letey *et al.* (2003), la

incorporación del concepto ha dividido profundamente a la comunidad científica, ya que ha sido institucionalizado y propugnado sin consideración de las debilidades y contradicciones implícitas en el propio concepto.

Es evidente que el concepto de calidad ha evolucionado a través del tiempo, tal y como lo menciona Forman (1951), su punto de vista de la calidad del suelo, lo menciona como un tema que no solo tenga que ver con la agricultura, sino también con la salud humana, afirmaba que hay un relación cercana entre la calidad del suelo y la calidad y cantidad de alimentos que produce, aunque la considera controversial, él aseguraba que era lógica ya que según sus observaciones, los suelos con poca fertilidad se restringían a producir ciertos tipos de cultivos y muchas veces la calidad de éstos se veía afectada, de igual forma que la salud de los animales que se alimentaban de ellos, finalmente la salud era afectada al formar parte de esta cadena alimenticia. Forman (1951), observó que cuando las personas tenían una dieta con productos adecuados y de calidad tendían a no enfermar o a enfermar poco.

El concepto sencillo de Friedman lo define como “la capacidad de un tipo específico de suelo para brindar un servicio” dentro de un sistema natural o manejado, sosteniendo la productividad de las plantas y animales, manteniendo o mejorando la calidad del aire y del agua, proporcionando soporte como hábitat y favoreciendo la salud humana. La valoración de esta calidad se efectúa, obteniendo un conjunto mínimo de datos de propiedades medibles del suelo, para establecer su capacidad de llevar a cabo servicios básicos como mantener la productividad, regular y particionar el agua y flujo de solutos, filtrar y amortiguar los contaminantes, y almacenar y ciclar los nutrientes. (Friedman, *et al.*, 2001)

Abrahams (2002) sostiene que la calidad de los suelos se relaciona directamente con la salud humana, y a la fecha muy poca gente considera seriamente esta relación, esta afectación se da directamente por la ingestión, inhalación o absorción por la piel de los constituyentes del recurso. La salud del individuo se puede afectar indirectamente cuando se afectan las propiedades de la atmósfera, hidrosfera y la biosfera.

Singer y Swing, (2000) aluden que históricamente la calidad del suelo ha sido equipada con la productividad agrícola, la documentación al respecto data desde el Imperio Romano, por la que no la considera una idea nueva; menciona que las prácticas de conservación de suelo para mantener su productividad son tan antiguas como la agricultura misma. Posteriormente, el concepto de calidad del suelo se empleó cuando los granjeros compraban tierras para sus actividades agrícolas, ya que la relacionaban con el pago de impuestos. En los años treinta, en Estados Unidos se iniciaban las estrategias para ayudar a los agricultores en la selección de cosechas y prácticas del manejo, con la finalidad de maximizar la producción y minimizar la erosión u otros efectos adversos. Además, estos autores señalan que en los años 70's la calidad de los suelos se relacionó con la capacidad de carga, es decir, suelos con alta productividad tienen alta capacidad de carga y son considerados de alta calidad; de esta forma relacionan la calidad con la sustentabilidad.

El concepto de calidad de suelo se desarrolla a finales de los años ochenta y a principios de los noventa y responde a definiciones de varias áreas con múltiples y específicas preocupaciones en la edafología, paisaje, manejo, mapeo de suelos, agricultores, etc. Numerosos factores han sido propuestos como componentes de la calidad de suelo, así como de metodología para su evaluación (Janvier *et al.*, 2007).

Algunos profesionistas en el área no consideran necesario el concepto de calidad de, ya que cada uno en su ámbito reconoce los buenos constituyentes del suelo, por ende conoce también donde encontrar esos "buenos" suelos. Otros consideran que es imposible cuantificar la calidad debido a las diferencias naturales y la cantidad de órdenes de suelo que se conocen, y más aun si estos son heterogéneos y se encuentran en diferentes lugares (Karlen *et al.*, 1997).

A continuación se mencionan algunas definiciones de calidad de suelo:

Larson y Pierce (1994), es la capacidad de funcionamiento dentro de los límites del ecosistema como con el medio ambiente externo al sistema.

Para Doran y Parkin (1994), es la capacidad que tiene un suelo para funcionar, dentro del ecosistema y los límites de uso de los terrenos, en el sostenimiento de la productividad biológica, en el mantenimiento de la calidad ambiental y promover la salud de las plantas, de los animales y de los seres humanos.

Acton y Gregorich (1995), consideran que la calidad determina la sustentabilidad agrícola, la calidad del ambiente y, como consecuencia de lo anterior, la salud de las plantas, de los animales y del ser humano.

Lal (1999), indica que, de manera similar a la degradación del suelo, existen tres tipos de calidad del suelo: la física, la química y la biológica. Establece además diferencias entre la degradación del suelo y la calidad del mismo. La primera es la pérdida de la productividad o utilidad potencial o actual como resultado de factores naturales o antropogénicas, en tanto que la segunda se refiere a la productividad y a la capacidad reguladora de su ambiente.

Para la Natural Resources Conservation Service (NRSC, 2001) es la capacidad que tiene cada tipo de suelo en su función natural o en su manejo como límite de un ecosistema. Además la clasifica en Calidad Inherente (CI) y Calidad Dinámica (CD). Propiedades tales como textura, mineralogía, color, etc., son innatas del suelo, determinadas por sus factores formadores y conforman así su calidad inherente. La cual al ser modificada por actividades antropogénicas, da como resultado una calidad dinámica. Tener información de la calidad dinámica de los suelos en una región determinada, se convierte en una herramienta para proponer y evaluar prácticas de conservación y uso del recurso.

Várallyay (2006), relaciona la calidad de los suelos con criterios de calidad de vida: salud, alimentos seguros y de calidad, calidad del agua, todos ellos

combinados en un medio ambiente agradable. Los criterios anteriores se relaciona del mismo modo con el uso racional y el manejo sustentable del recurso.

A pesar de que diversos grupos de científicos se han preocupado por desarrollar un concepto de calidad de suelo. Bouma (2006), reconoce que no se tienen una definición que sea un elemento esencial en las regulaciones del medio ambiente, en contraste con la calidad de agua y del aire que actualmente se encuentran bien definidas.

Cabe señalar que en México, la NORMA Mexicana NMX-AA-091-1987 Calidad del Suelo – Terminología. Soil Quality – Terminology, solo establece un marco de referencia en cuanto a los términos más empleados en el ámbito de la prevención y control de la contaminación del suelo originada por residuos sólidos.

La definición más apropiada de calidad de suelo para este estudio es propuesta por Friedman *et al.*, (2001) y la enuncian como “la capacidad de un tipo específico de suelo para brindar un servicio” dentro de un sistema natural o manejado, en el que se sostiene la productividad de plantas y animales, manteniendo o mejorando la calidad de aire y del agua, proporcionando un soporte como hábitat y favorecido la salud humana. La valoración de esta calidad se efectúa, obteniendo un conjunto mínimo de datos de propiedades medibles del suelo, para establecer su capacidad de llevar a cabo servicios básicos como mantener la productividad, regular y distribución del agua y flujos de solutos, filtrar los contaminantes y almacenar y ciclar los nutrientes.

3.4. Indicadores de calidad de suelo.

Específicamente en cuanto a indicadores de calidad de suelos Parkin (1996), señalan que estos deben ser de uso práctico y útiles a través de un rango de condiciones socioeconómicas y ecológicas; considera que deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Correlacionar adecuadamente con los procesos del ecosistema
- Integrar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y los procesos; que sirvan como información básica necesaria para la estimación de las propiedades o funciones del suelo.
- Ser relativamente fáciles de usar, bajo condiciones de campo y, por lo tanto, poder ser empleadas tanto por productores como por especialistas.
- Ser sensibles a variaciones de manejo y del clima.
- Cuando sea posible, formar parte de bases de datos de suelo ya existentes.

Para Dumanski (1997), los indicadores son los instrumentos que ayudan a monitorear si se está en el camino hacia los sistemas de uso sustentable de las tierras. Indica que se han realizado muchos intentos de definir conjuntos de indicadores de calidad de suelo y de tierras; sin embargo, la mayoría ha involucrado una selección de indicadores a priori y largas listas de propiedades del suelo (más que de indicadores de cambio), pero falta una discusión detallada de las importantes relaciones causa-efecto que definen los impactos de las intervenciones humanas sobre el paisaje. Así mismo, no han sido suficientes los intentos de coordinación de los diferentes programas de indicadores.

Por otro lado Karlen, *et al.* (1997), proponen que la evaluación de la calidad del suelo se basen en 4 funciones críticas de éste:

- a) el permitir la entrada de agua,
- b) retener y suministrar agua para las plantas,
- c) resistencia a la degradación y
- d) sostener el crecimiento de las plantas.

Una vez que una propiedad específica de calidad se identifica para un tipo de suelo, se requiere de información acerca de estándares de calidad del mismo para un conjunto de condiciones determinadas. Esto involucra información acerca del nivel crítico y rango del atributo (propiedad) asociado a cambios significativos en la función de interés del suelo (por ejemplo, la producción óptima de un cultivo).

La identificación de los atributos clave del suelo, que son sensibles a las funciones que desempeña, permite el establecimiento de conjuntos de datos mínimos. Tales conjuntos de datos se componen de un conjunto mínimo de propiedades del suelo que ayudarán a una evaluación práctica de uno o varios procesos de importancia para una función específica del mismo (Carter, *et al.* 1997; Singer y Swing, 2000).

Es importante señalar que debe considerarse la escala a la cual se trabaja, esto es, la interrelación entre los datos de calidad del suelo y la interpretación que se realiza de los mismos, a la cual afecta la variabilidad espacial y temporal de los datos (Halvorson, *et al.*, 1997). Al evaluar la calidad del suelo para propósitos específicos, como el almacenamiento de desechos peligrosos, se requerirá de información específica del sitio, así como de alguna medida de la fiabilidad en la estimación de la calidad del suelo. Esas últimas estimaciones a pequeña escala deben también situarse dentro del contexto de otros fenómenos que se presentan a una escala relativamente grande, como las distribuciones de precipitación y de drenaje. En el caso de un productor, preocupado especialmente por los rendimientos de cultivo, la calidad se evaluará en una escala proporcional al tamaño de sus parcelas y dentro de un periodo semejante al ciclo de crecimiento

del cultivo. En cambio, el monitoreo ambiental requerirá de una evaluación en grandes cantidades de terreno y durante periodos de tiempo adecuados de forma que sea posible identificar tendencias de cambio en el manejo de las áreas (Cruz *et al.*, 2003).

Los procesos asociados con la calidad del suelo se dividen, en ocasiones, por su nivel de aplicación, esto es, aquellos que predomina a una escala muy pequeña, microescala; los que predominan a una mesoescala, dentro de los agregados del suelo (cuando alcanzan el orden de metros, se conocen como escala a nivel de parcela); y la macroescala, esto es, unidades de paisaje a escala regional o mayor.

Las distribuciones a través del tiempo de las variables del suelo aparecen también como tendencias definidas a largo plazo, al exhibir comportamiento cíclicos, a fluctuar erráticamente, o a parecer constantes. Esta variación temporal se relaciona frecuentemente con ciclos de transferencia de energía y de masa en el ambiente. En general, existe una relación inversa entre la variación temporal y la frecuencia de fluctuación del ciclo ambiental. Por ejemplo, una variable del suelo afectada por la temperatura, es probable que varíe menos durante un ciclo de temperatura diaria (evento de alta frecuencia) que durante un ciclo anual (evento de baja frecuencia). En otros casos, como las variaciones anuales de rendimiento de un cultivo, es probable que sean menores que las variaciones registradas durante una década (Cruz *et al.*, 2003).

Diversos indicadores de calidad del suelo varían significativamente durante una estación de crecimiento de un cultivo, incluyendo propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo. También puede haber variación según la profundidad de muestreo o el tipo de suelo. Una variabilidad temporal muy alta de mediciones *in situ* sugiere que es necesario realizar la toma de muestras frecuentemente o que sería más adecuado estandarizar las respuestas potenciales de las mediciones de laboratorio para el muestreo de variables del suelo a largo plazo y a gran escala.

La Tabla 1.1, se muestran algunas variables del suelo relacionadas con la calidad del mismo y sus escalas de tiempo relativas (Cruz *et al.*, 2003).

Algunas de estas variables cambian a través de un amplio rango de escalas de tiempo. En general, las variables que cambian dinámicamente, como la humedad del suelo y la actividad microbiana, se relacionan con una variabilidad espacial relativamente alta, o por el contrario las que cambian lentamente, como la profundidad del suelo y la textura, usualmente presentan una baja variabilidad espacial (Cruz *et al.*, 2003).

En años recientes debido a la inquietud con respecto a la degradación del suelo y a la necesidad de un manejo sustentable de los agroecosistemas, resurgió la preocupación hacia las variables del suelo (Carter *et al.*, 1997). Aunado a lo anterior, existe la idea del uso del suelo, que ha enfatizado su valor y el de sus propiedades para una función específica.

Tabla 3.1. Rangos de escala de tiempo para diferentes propiedades del suelo (Cruz *et al.*, 2003).

Altamente dinámico Menos de 1 año	Dinámicos de 1 a 10 años	Relativamente estáticos de 10 a 1000 años
Densidad aparente	Porcentaje de marchitamiento	Superficie específica
Porosidad total	Acidez del suelo	Composición mineral primaria
Tasa de infiltración	Capacidad de intercambio catiónico	Composición química de la parte mineral
Permeabilidad	Cationes intercambiable	Textura
Compactación	Composición iónica de extractos	Propiedades sálicas, cálcicas, sódicas, vérticas
Temperatura del suelo	Estructura	Color
Composición del aire del suelo	Propiedades fúlvicas	Profundidad del material parental
Capacidad de retención de agua	Propiedades gléyicas	Cambio textura abrupto
Capacidad de campo	Nutrientes adsorbidos	Reservas de nutrientes en minerales
Conductividad hidráulica	Materia orgánica lábil adsorbida a las arcillas	Materia orgánica químicamente estabilizada
Contenido de humedad	Intemperismo de carbonatos	Intemperismo de silicatos y arcillas
pH	Micro fauna y meso fauna	Vegetación forestal
Nutrientes solubles	Crecimiento vegetal y rendimiento	Concreciones de hierro
Materia orgánica activa o soluble	Dinámica radicular	
Conductividad eléctrica		
Aspectos relacionados con microorganismos del suelo, tales como respiración, C y N de la biomasa, crecimiento		

Este enfoque ecológico reconoce las interacciones suelo-ser humano; de esta forma, la calidad del suelo es inseparable del concepto sustentabilidad del sistema y se considera un indicador clave en este aspecto.

Asignar un valor al suelo con respecto a un uso o propósito específico conduce al concepto de calidad del suelo (Beare *et al.*, 1997; Carter *et al.*, 1997). Sin embargo, en contraste con el aire y el agua, para los cuales la función se relaciona directamente con el consumo humano y animal, la función se relaciona directamente con el consumo humano y animal, la función que se asigna al suelo

varía y, usualmente, no se vincula de una manera directa con la salud humana. Por lo tanto, el concepto de calidad se relaciona con una función o uso específico del mismo.

Karlen *et al.*, (2003), mencionan que la calidad del suelo es una herramienta científica básica que puede permitir el avance en la evaluación, aprendizaje y entendimiento del recurso. Consideran que dos de los factores más importantes que se asocian con su calidad son: propiedades y procesos inherentes como dinámicos; y que en la evaluación se deben reflejar propiedades biológicas, físicas, químicas, así como sus procesos e interacciones con el medio ambiente que les rodea. Sin embargo, admiten que no hay un índice ideal o mágico que asegure su calidad, pero su evaluación puede realizarse utilizando marcos de referencia en dependencia de las propiedades y metas establecidas por el evaluador, identificando las funciones críticas necesarias del suelo para el uso que se pretende destinar.

3.5. *Indicadores para la estimación de la calidad del suelo.*

La estimación de la calidad del suelo se realiza por observación o cuantificación de algunas propiedades o procesos. Una sola propiedad no puede ser utilizada como índice de calidad (Muckel y Mausbach, 1996). La selección de indicadores debe basarse en:

- El uso
- La relación entre el indicador y la función que se le va asignar
- Facilidad y certeza de la medición
- Variación del tiempo de muestreo y el área a muestrear.
- Habilidad para usar e interpretar la información.

Por otro lado cuando se evalúa la calidad de un suelo es importante elegir indicadores que den información integral sobre sus propiedades, la productividad biológica y la calidad del ambiente circundante (Astier *et al.*, 2002).

La evaluación de la calidad se puede realizar mediante el uso de indicadores, estos se pueden categorizar en cuatro grupos generales: visuales, físicos, químicos y biológicos (Muckel y Mausbach, 1996).

- **INDICADORES VISUALES.** Pueden obtenerse por la observación directa o por interpretación fotográfica. Algunas de las observaciones pueden ser: exposición del subsuelo, cambio de coloración, relieve, pendiente, respuesta de la planta, pérdida de lluvia, etc. Los indicadores visuales pueden claramente indicar si la calidad se mantienen o está cambiando (Muckel y Mausbach, 1996).
- **INDICADORES FISICOS.** Estos se relacionan con el arreglo de las partículas sólidas y los espacios porosos (Muckel y Mausbach, 1996). Las características físicas son importantes en la evaluación de la calidad del suelo debido a que no se pueden mejorar fácilmente. Estos indicadores influyen en la producción de cultivos, y se determinan por: las limitaciones

que se pueden encontrar en el crecimiento de las raíces así como penetración y expansión; determinan la retención de agua por suelo, y disponibilidad de agua para la planta, así como la aireación. Estos factores influyen en: estabilidad de agregados, densidad aparente, mineralogía de las arcillas, consistencia en seco y húmedo, profundidad de las raíces, conductividad hidráulica, difusión de oxígeno, distribución del tamaño de la partícula, porosidad (tamaño, distribución y conectividad), estructura, infiltración, profundidad capacidad de almacenamiento de agua y temperatura (Singer y Swing, 2000).

- **INDICADORES QUÍMICOS.** Las condiciones químicas afectan directamente la relación suelo-planta, la calidad de agua y la disponibilidad de nutrientes. En este caso se evalúan los procesos químicos que se llevan a cabo en el sistema suelo, se consideran además los contaminantes que pueda tener, tales como metales pesados, además de requerir de una muestra para analizarse, requiere del entendimiento de la relación entre los efectos del comportamiento de los sistemas biológicos y su interacción con las formas minerales. La disponibilidad de nutrientes depende de procesos físicos y químicos, tales como la intemperización y su capacidad de amortiguamiento; propiedades tales como contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico tienen que ser analizadas a bajos y altos valores de pH, ya que de ello depende la disponibilidad de nutrientes para las plantas o de elementos tóxicos. Algunas de las propiedades propuestas para determinar la calidad de suelos en este sentido son: porcentaje de saturación de bases; capacidad de intercambio catiónico; disponibilidad, concentración, movilidad y presencia de contaminantes; conductividad eléctrica; salinidad; ciclo de nutrientes; pH, disponibilidad y contenido de nutrientes para las plantas (Muckel y Mausbach, 1996; Singer y Swing, 2000).
- **INDICADORES BIOLÓGICOS.** Si hablamos de calidad de suelo en términos biológicos, se tiene que considerar que este recurso soporta una diversa población de organismos en diferentes tamaños desde virus hasta grandes mamíferos que generalmente interactúan positivamente con las

plantas y otros componentes del sistema. Sin embargo algunos organismos como nematodos, bacterias y hongos patógenos reducen la productividad de las plantas. Algunas propuestas de calidad de suelo en este aspecto se enfocan en los beneficios que aportan los organismos más que en los efectos adversos que pueden causar, sin embargo ambas condiciones son importantes en la evaluación de la calidad. Algunas de las propiedades consideradas son: carbono orgánico, masa microbiana, biomasa total (bacterias, hongos); nitrógeno potencialmente mineralizable, respiración del suelo, procesos enzimáticos, utilización del substrato, análisis de ácidos grasos y nucleicos (Singer y Ewing, 2000).

Los indicadores físicos, químicos y biológicos mínimos para determinar la calidad del suelo de acuerdo a Doran y Parkin (1996) se presentan en el Tabla 3.2

Específicamente respecto al recurso suelo se deben describir de manera adecuada las presiones sobre el, así como las condiciones y respuestas que se han implementado para su conservación y manejo; es necesario diferenciarlos en función del uso que se le da por un lado están los suelos que sostienen ecosistemas naturales con mayor o menor grado de conservación y que aún mantienen su función original en el ecosistema; mientras que, por otro lado, tenemos aquellos donde la cubierta vegetal original se ha removido por completo para ser utilizados en alguna actividad económica, como es el caso de la agricultura (SEMARNAT, 2005b).

En el primero de ellos podría buscarse la restauración, mientras que en el segundo, los objetivos deberían enfocarse al conservación de las características productivas.

Cabe señalar que estos indicadores se relacionan a su vez con otros recursos naturales, por ejemplo, el consumo aparente de plaguicidas y fertilizantes se relacionan también con la calidad del agua.

Tabla 3.2 Indicadores físicos, químicos y biológicos para evaluar la condición, calidad y salud del suelo (Doran y Parkin, 1996).

Propiedad	Relacion con la condicion y funcion del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación
	Físicas	
Textura	Retencion y transporte de agua y de compuestos quimicos; erosión del suelo y estimacion de variabilidad	% de arena, limo y arcilla, pérdida del sitio o posición del paisaje.
Profundidad del suelo, espesor del horizonte superficial y profundidad de las raíces	Estima la productividad y la erosión potencial; normaliza el paisaje y la varibilidad geográfica	Cm o ; en sitios no cultivados o donde hay varaición de la posoción del paisaje.
Infiltración y densidd aparente	Potencial de lavado; productividad y erosividad	Minutos/2.5 cm de agua y f/cm^3 , en linea o posición del paisaje
Capacidad de retencion de agua	Relacion con la retención de agua, transporte y erosividad; disponibilidad de agua , textura y materia orgánica.	% ($cm^3/cm \cdot$), cm de agua disponible a 30 cm; intensidad de la precipitación.
	Químicas	
Materia organica (N y C total)	Define la fertilidad del suelo, su estabilidad y la extensión de la erosión, se usa en modelación	Kg de C o N/ha a 30 cm; superficie no cultivadas o áreas de control
pH	Define los límites de la actividad biológica y quimica; escencial para la modelación de los procesos	Comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad microbiana
Conductividad electrica	Define los limites de la actividad microbiológica y vegetal	dSm^{-1} , comparación entre los limites superiores e inferiores para la actividad microbiológica y vegetal
N, P y K extraíbles	Nutrientes para la planta, pérdida potencial de N, productividad e indicadores de la calidad ambiental	Kg/h a 30cm; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
	Biologicas	
C y N de la biomasa microbiana	Potencial catalítico microbiológico y lugar de depósito de C y ; modelación estimar los primeros efectos en el manejo de la materia orgánica	Kg de N o C/ha a 30cm; relaativo al C y N total o CO_2 producidos
N potencialmente mineralizable (incubación anaeróbica)	Productividad del suelo y potencial de suministro de N; modelación de procesos	Kg de N/ha a 30 cm; relativo al contenido total de C o N
Respiración del suelo, contenido de agua y temperatura	Kg C/ha; relativo a la actividad microbiológica de la biomasa, pérdida de C vs C depositado	Medidad de la actividad microbiologica, estimación de la actividad de la biomasa

3.6. Importancia de los indicadores ambientales.

La importancia de los indicadores ambientales se refleja en la necesidad de proporcionar a los tomadores de decisiones y al público en general una herramienta mediante la cual se presenta información concisa y sustentada científicamente, de tal manera que pueda ser entendida y usada fácilmente.

El trabajo de indicadores se ha dirigido principalmente hacia la consecución de tres objetivos ambientales para alcanzar el desarrollo sustentable:

- Proteger la salud humana y el bien estar general de la población.
- Garantizar el aprovechamiento sustentable de los recursos.
- Conservar la integridad de los ecosistemas.

El desarrollo de indicadores pretende también convertirse en una herramienta fundamental como:

- Mejorar la base de información ambiental en México.
- Mejorar la percepción pública de los problemas ambientales.
- Evaluar condiciones y tendencias ambientales a escala regional, nacional o global.
- Proveer información de alerta rápida
- Favorecer la integración de los asuntos ambientales en las políticas económicas.
- Cumplir con los compromisos internacionales en materia ambiental
- Realizar análisis comparativos entre países y regiones

CAPITULO 4

SELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICADORES

4. Antecedentes

4.1. Modelo Presión -Estado -Respuesta.

En el presente trabajo se utilizo el concepto del modelo Presión-Estado-Respuesta (PER) ajustado a la propuestas por la SEMARNAT (Fig. 4.1), y complementando este a la porción sureste del estado de Hidalgo, México.

Los datos macroeconómicos utilizados en los marcos conceptuales más estandarizados INEGI, (1992) excedían a la disponibilidad de datos y objetivos del trabajo, y en consecuencia, se asumió un conjunto de indicadores propios en un marco de referencia ajustado a un modelo Presión-Estado-Respuesta (PER).

Tabla 4.1. Indicadores propuestos en el modelo PER para evaluar el recurso suelo (SEMARNAT, 2005b).

Indicadores de presión	Indicadores de estado	Indicadores de respuesta
Cambio de uso del suelo	Superficie afectada por degradación edáfica	Superficie incorporada a programas institucionales para la conservacion y rehabilitacion de suelos.
Superficie agricola		
Consumo aparente de plaguicidas		
Consumo aparente de fertilizantes		
Superficie afectada por sobrepastoreo		
Tenencia de la tierra		

Según la OECD (1993) el marco de referencia PER está basado en un concepto de la causalidad: las actividades humanas ejercen **presiones** sobre el medioambiente (deforestación, pérdida de la cobertura vegetal, disminución de la capa fértil), las cuales van modificando la calidad y cantidad de los recursos naturales, reflejado en este caso, por el cambio de uso forestal a agrícola característico de la zona (pérdida de la vocación del suelo, pérdida de nutrimentos del suelo, disminución de él aporte de materia orgánica y pérdida de la capa arable del suelo) **estado**. La sociedad entonces responde a estos cambios ambientales con el abandono de las tierras donde a falta de productividad de los suelos en el mediano plazo (3-5 años) surgen el abandono de los predios que en su inicio fueron forestales, y que debido a la falta de actividad agrícola redituable se dispara fenómenos de migración hacia las grandes ciudades, teniendo el último eslabón del modelo **respuesta** medio ambiental, económicas y sectoriales (*la respuesta social*).

De esta manera, se describe general el marco conceptual Presión-Estado-Respuesta (REP), en el que se ha basado este trabajo.

4.2. Formulación de Indicadores de Calidad Ambiental Locales (suelos de la porción sureste).

En el sureste del estado de Hidalgo se aplicara un Índice de Calidad Ambiental mediante la agregación de indicadores utilizando el modelo PER, Presión, Estado y Respuesta (Cantú *et al.*, 2003). Además, se evaluaron parámetros del suelo como potenciales indicadores de calidad aplicando el modelo PER e incorporando un modelo que contempla las funciones del suelo (Cantú *et al.*, 2001; Cantú *et al.*, 2002). De lo anteriormente expuesto se desprende la necesidad de contar con un grupo mínimo de indicadores de calidad de suelos, de simple medición y con validez local, que pueda ser utilizado por dependencias gubernamentales (SAGARPA, SEMARNAT y COEDE) y responsables del manejo

del suelo en la evaluación y seguimiento en el tiempo de la calidad de este recurso.

Para evaluar la calidad de los suelos se aplicó la metodología desarrollada por Cantú (2007), teniendo en cuenta que el número de indicadores debe ser mínimo, se eligieron las propiedades (Cantú, 2002) que para la porción sureste del estado de Hidalgo y el tipo de suelo cumplieron con los criterios que se consideran más relevantes (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Indicadores de calidad, unidades, valores mínimos (I_{\min}) y máximos (I_{\max}) definidos para la porción suroeste del estado de Hidalgo, Municipio de Acaxochitlán.

INDICADOR	UNIDAD	I Max	I Min
		Valor máximo	Valor mínimo
C org	%	12	0.6
pH H ₂ O		7	5.53
SATURACIÓN DE BASES	%	100	50
CIC	cmol(+)/kg ⁻¹	40	22.65
MATERIA ORGANICA	%	8.28	1

Para la obtención de un valor único de cada parámetro se realizó un promedio ponderado de acuerdo al área de estudio total. Los indicadores fueron normalizados utilizando una escala 0-1 que representan, respectivamente, la peor y mejor condición desde el punto de vista de la calidad, independientemente de los valores absolutos medidos para cada indicador. Basándose la existencia de dos situaciones posibles:

- a) la primera es cuando el valor máximo del indicador (I_{\max}) corresponde a la mejor situación de calidad de suelo.

Valor normalizado del indicador: $V_n = 1$ y el cálculo es:

$$V_n = I_m - I_{\min} / I_{\max} - I_{\min}$$

- b) La otra situación es cuando el valor I_{\max} corresponde a la peor situación de calidad de suelo $V_n = 0$ y se calcula como:

$$V_n = 1 - (I_m - I_{\min} / I_{\max} - I_{\min})$$

Donde:

V_n = valor normalizado

I_m = medida del indicador

I_{\max} = valor máximo del indicador

I_{\min} = valor mínimo del indicador

Los valores máximos y mínimos fueron establecidos de diferentes formas para cada indicador. Para algunos atributos, especialmente para las condiciones óptimas, se tuvieron en cuenta umbrales calculados a partir de los valores de los suelos en estudio, mientras que en otros se utilizaron criterios teóricos. Para el C orgánico se consideró como mínimo el requerimiento para cumplir con la condición de mólico (Soil Survey Staff, 2006) y como máximo el valor límite para la condición de mólico. El valor mínimo de pH fue establecido considerando el promedio de los suelos en estudio y el máximo de calidad correspondió al pH neutro (Whittaker *et al.*, 1959; Soil Survey Staff, 1993). Para la saturación de bases se tomaron el valor mínimo (50%) y el máximo (100%) requeridos para cumplir con la condición de mólico (Soil Survey Staff, 2006).

Para el indicador CIC el valor máximo se obtuvo de la clasificación Muy alta correspondiente a Capacidad de Intercambio Cationico, para suelos ácidos de la NOM-021-RECNAT-2000 y el mínimo correspondió a los valores promediados de los valores de los suelos en referencia.

En el caso del % de M.O., se tomó como mínimo la proporción de M.O. correspondiente al C_{org} (0.6 % de C_{org} = 1.0 % de M.O.), y como máximo el valor límite superior para el criterio de Mólico (Soil Survey Staff, 2006).

Finalmente, se estableció un índice de calidad de suelos (ICS) promediando los valores de todos los indicadores.

Para la interpretación del ICS se utilizó una escala de transformación en cinco clases de calidad de suelo. Tabla 4.3

Tabla 4.3. Clasificación de calidad de suelos para la porción sureste del estado de Hidalgo.

ÍNDICE DE CALIDAD DE SUELO	ESCALA	CLASE
Muy alta calidad	0.80 - 1.00	1
Alta calidad	0.60 - 0.79	2
Moderada calidad	0.40 - 0.59	3
Baja calidad	0.20 - 0.39	4
Muy baja calidad	0.00 - 0.19	5

CAPITULO 5

5.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar indicadores de calidad ambiental adecuados a los suelos ácidos de la porción sureste del estado de Hidalgo, a través de selección y caracterización de propiedades químicas para ubicar zonas de manejo y rehabilitación.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar las propiedades químicas de los suelos de la porción sureste del estado de Hidalgo.
2. Identificar indicadores de calidad ambiental en suelos ácidos.
3. Seleccionar indicadores de calidad ambiental en suelos ácidos.
4. Desarrollar y aplicar un set mínimo de indicadores de calidad ambiental del suelo (Acrisoles) para evaluar su calidad.
5. Elaboración de clasificación de la calidad de los suelos estudiados en base al índice construido para este fin.
6. Elaborar gráficos de distribución de isoconcentraciones de elementos en los suelos de la porción sureste.

CAPITULO 6

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y MÉTODOLÓGIA

6. Localización y características del área de muestreo

6.1. Localización y vías de comunicación.

El área de estudio se localiza en la porción al sureste del estado de Hidalgo en el municipio de Acaxochitlán, al límite con el estado de Puebla, México. Sus coordenadas son: 20° 10' 25" latitud norte, 98° 07' 50" longitud oeste y una altitud de 2140 msnm.

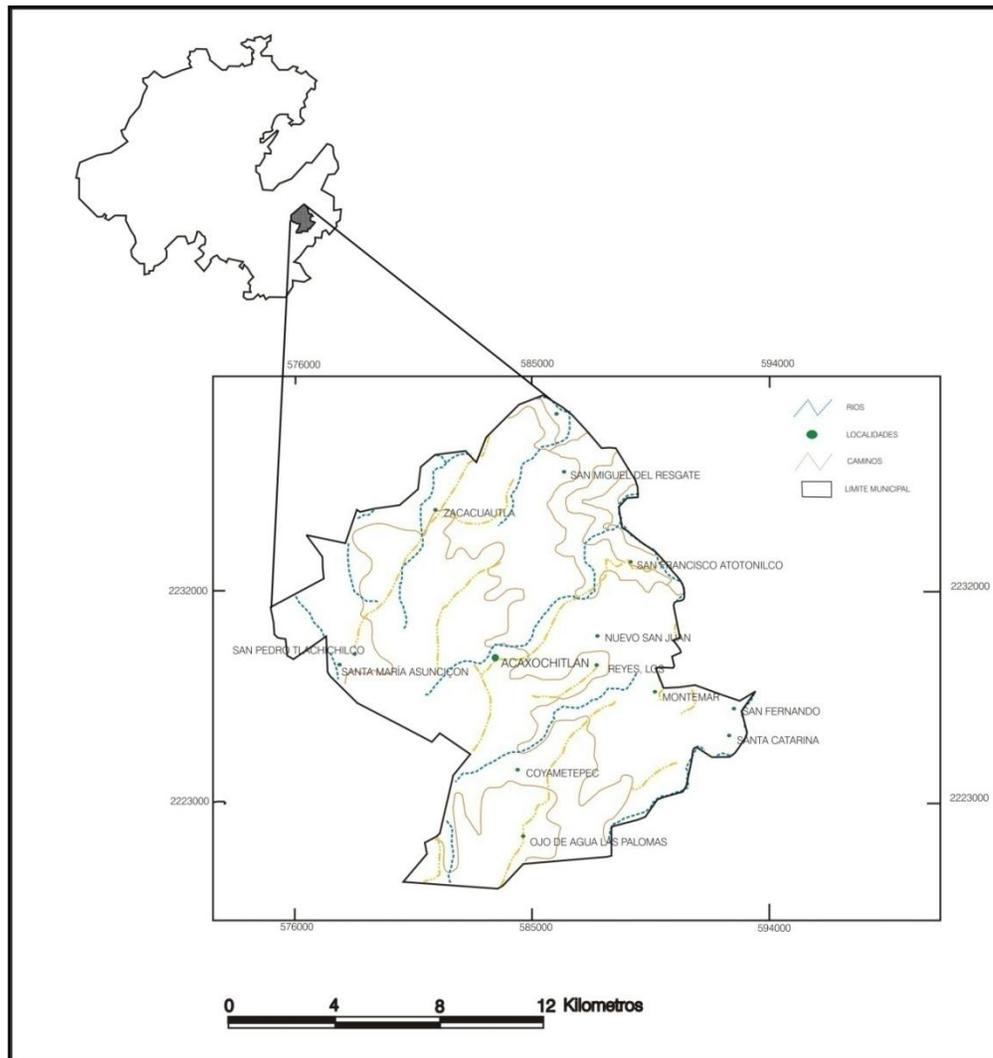


Figura 6.1. Mapa de localización de la porción sureste del estado, Municipio de Acaxochitlán, Hidalgo.

La superficie que ocupa el sitio de estudio es de morfología ondulada, rodeada por cerros y lomeríos de escasa altura y suelos que van de poco erosionados a muy erosionados.

El acceso principal a esta zona es a través de la carretera Pachuca-Tulancingo con un recorrido de 45 km, después al llegar a Tulancingo se continúa por la carretera federal No. 130 México-Tuxpan a una distancia de 36 km hasta llegar a la comunidad de Acaxochitlán, los recorridos por toda la zona de muestreo es principalmente por caminos de terracería y brechas utilizadas por los agricultores para la recolecta de cosechas por medio de tractores y animales de carga, algunas de ellas se enlazan con las localidades aledañas al municipio de Acaxochitlan, Fig. 6.2.

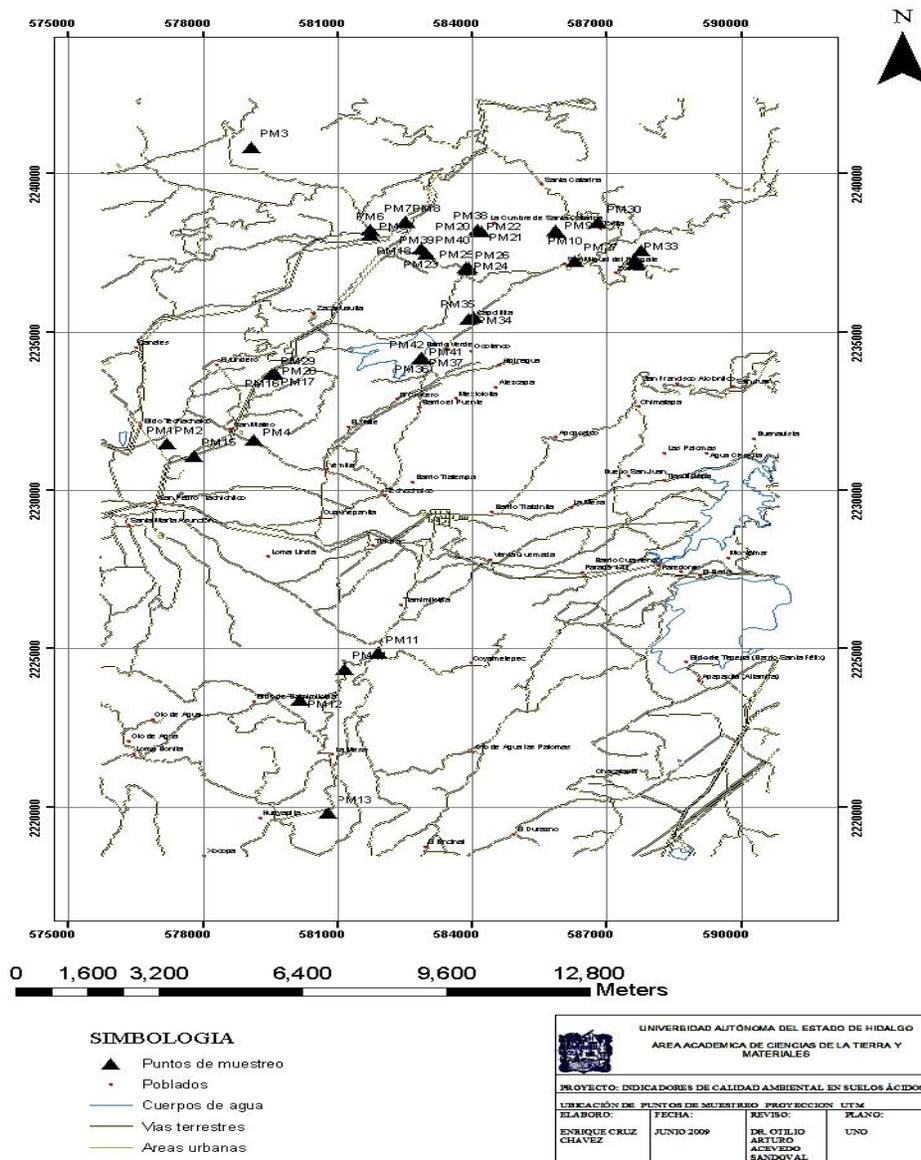


Figura 6.2. Vías de acceso.

6.2. Clima, temperatura y precipitación.

El clima presente en la región según la clasificación climática de Köppen Modificada por Enriqueta García de Miranda, en el año de 1989 es el templado húmedo con abundantes lluvias en verano C(m). Su temperatura media anual se encuentra en los 15°C, y su precipitación media anual es de 1,500 a 2,500 mm. (1981-2007) (datos proporcionados por CNA, México).

Los datos de precipitación fueron tomados de 3 estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio. Para tener una idea de la cantidad de lluvia que es captada en la presa y para entender como los escurrimientos han sido responsables del acarreo de los sedimentos; en general se aprecia que en esta zona las precipitaciones son altas. Los valores son variables de un año a otro pero en general caen en un rango de 1000 a 2500 mm., que corresponde a épocas de lluvias anuales.

6.3. Escenario ecológico.

La contaminación es un fenómeno que existe desde que se originó la Tierra. Desde hace ya tanto tiempo, las sustancias contaminantes se dispersan y transportan sobre y dentro de los recursos naturales modificando sus características originales.

La contaminación de los suelos puede proceder de fuentes naturales o de actividades humanas. En la actualidad la más importante, sin duda, es la provocada por el hombre.

Algunas principales alteraciones antropogénicas en la zona son:

- **Vertidos urbanos.** Resultado de la actividad doméstica se producen principalmente residuos orgánicos, pero se carece de un sistema de recolección con ello causando la acumulación, vertido a cielo abierto en predios y barrancas causando el arrastre y acumulación de estas tierras abajo, causando con ello el deterioro del paisaje y contaminación de manos acuíferos y del suelo.
- **Agricultura y ganadería.** La vocación natural del suelo en la región sureste del estado esta predominado por predios con uso de suelo forestal, con un cambio

abrupto causado por la deforestación hacia actividades agrícolas que producen vertidos de pesticidas, fertilizantes y restos orgánicos de animales y plantas que contaminan de una forma difusa pero muy notable los suelos.

El escenario ecológico de las inmediaciones del área de estudio muestran un fuerte impacto principalmente por la deforestación de los bosques que se aprecian (Fig.6.3) además de suelos erosionados por actividad hídrica y eólica; mostrándose un gran impacto antropogénico debido a que no existe un control adecuado orientado al manejo sustentable de los recursos.



Figura 6.3. Escenario ecológico de los suelos del Acaxochitlán, estado de Hidalgo.

6.4. Geología regional.

El área de estudio está ubicada dentro de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental (SMO) que es un cinturón orogénico que se levantó hacia finales del Cretácico Superior y principios del Terciario Inferior. Es producto de la deformación continental denominada regionalmente como Orogenia Laramide.

Esta megaestructura tiene más de dos mil kilómetros de extensión y presenta una directriz irregular que se extiende desde la parte centro-sur de México, hasta el norte y noreste, continuando al suroeste de Estados Unidos de América.

En la porción que corresponde al estado de Hidalgo, Puebla y Veracruz, la Sierra Madre Oriental (SMO) exhibe una dirección preferencial de las estructuras NO-SE, casi paralelas al Golfo de México y en las que alteran pliegues de tipo sinclinal y anticlinal de morfologías variadas.

La erosión que muestra la mayoría de las estructuras plegadas permite observar en algunas localidades del norte y noreste del Estado de Hidalgo formaciones precámbricas, paleozoicas y mesozoicas; mismas que son parcial o totalmente cubiertas por materiales volcánicos del Terciario pertenecientes al Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT). (Ortega *et al.*, 1992).

6.4.1. Geología del área de estudio.

Geológicamente el área donde está situado el municipio de Acaxochitlán está formada por rocas ígneas extrusivas (Fig. 6.3), principalmente basaltos y andesitas en derrames masivos de color gris a café rojizo, muy intemperizados.

Estudios con anterioridad han determinado las edades de las series Volcánicas designándolas como rocas volcánicas del Oligoceno-Mioceno y basalto del Pleistoceno que como resultado del intemperismo han dado lugar a una cubierta de arcillas de espesor variable y con una extensión horizontal considerable. A lo largo de cortes de la carretera se observa un claro intemperismo de las rocas, alcanzando en algunas partes profundidades considerables, debido a la gran precipitación que se registra en la zona. (Ortega *et al.*, 1992).

El suelo utilizado se encuentran en la Formación Atotonilco El Grande, constituidas por rocas basálticas del periodo terciario, compuestas por fenocristales de olivino (20%), augita (10%), óxidos de Fe-Ti (5%) y andesina (3%), el resto lo constituye la matriz, representada por un intercrecimiento de microfenocristales de andesina y augita (Castro-García y Córdoba, 1994; INEGI, 1997).

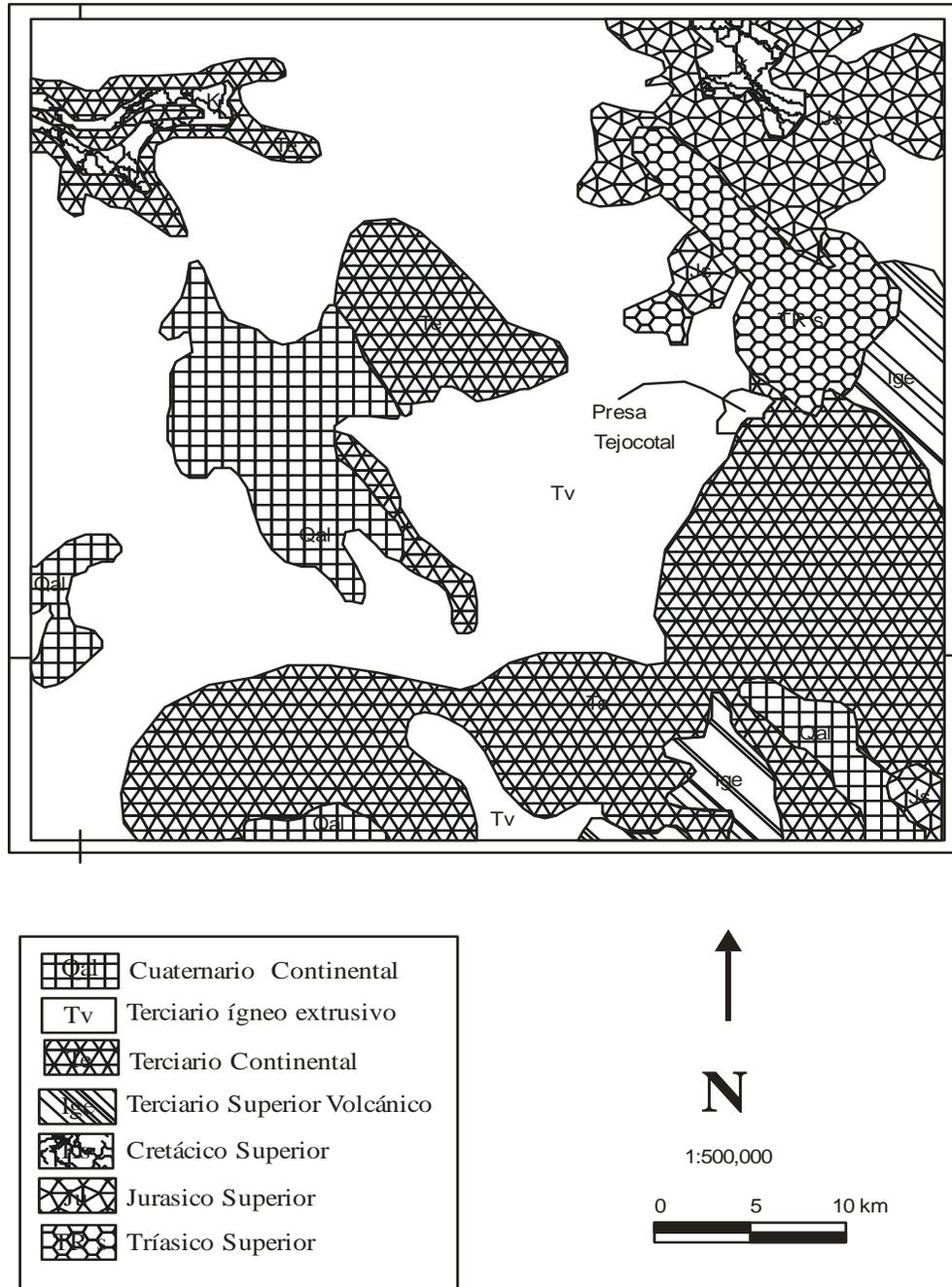


Figura 6.4. Mapa geológico del área de estudio. Porción de la carta geológica F14D83

6.4.2. Clima y Tipo de vegetación.

El régimen de humedad del suelo es údico y el régimen de temperatura del suelo, méxico (Soil Survey Staff, 1995). En la región de estudio el uso dominante del suelo es forestal, donde la vegetación que predomina es *Pinus patula*, *Quercus spp*, *Pinus teocote*, los bosques en general presentan una alta perturbación por actividad antropogénica, se ha cambiado el uso del suelo forestal a agrícola predominando los cultivos de maíz y frijol.



Figura 6.5. Vegetación predominante *Pinus patula*, *Quercus spp*, *Pinus teocote* y relieve de lomeríos de altas pendientes.

6.5 Características de muestreo y recolección de muestras en la zona de estudio .

La selección de cada muestra de suelos se realizó a partir de un estudio previo de fotointerpretación, utilizando fotografías aéreas, pancromáticas, blanco y negro, escala 1: 30,000, y material cartográfico de apoyo (Van Zuidam, 1979), esta fase se complementó con recorridos por la zona.



Figura.6.6. Recorridos de campo y verificación de sitios de muestreo en base a estudio de cartografía.

De acuerdo a un muestreo aleatorio, se colectaron 9 sub-muestras en la capa arable con una profundidad de 30 cm. que se homogeneizaron para formar una muestra compuesta realizando 2 cuarteos sucesivos, para una muestra final de 2 kg. para cada muestra compuesta de suelo colectando un total de 15 muestras compuestas de suelo, éstas se sometieron a pre tratamiento donde se secaron bajo sombra y tamizaron a través de una malla de 2 mm. para sus respectivos análisis químicos.



Figura.6.7. Muestreo de suelos superficiales (0-20 cm.) de la zona de estudio Acaxochitlan, Hgo.

Cada uno de los puntos de muestreo fue georeferenciado mediante un GPS Marca Garmin modelo 12 XL utilizando NAD 83 en coordenadas UTM, para su registro y captura para su posterior integración en diagramas de isoconcentraciones.



Figura 6.8. Posicionamiento de puntos de muestreo.

Tabla 6.1. Coordenadas en UTM (Universal Transversa de Mercator- Proyección) de los puntos de muestreo.

MUESTRA	UTM	
	X	Y
M₁ A	577235.117	2231470.38
M₂ A	577220.604	2231470.31
M₃ A	579113.982	2240833.27
M₄ F	579173.502	2231602.07
M₅ F	581761.179	2238069.67
M₆ F	581757.522	2238229.51
M₇ A	582542.686	2238473.02
M₈ F	582513.671	2238472.88
M₉ F	585910.121	2238142.04
M₁₀ A	585895.262	2238212.67
M₁₁ A	581925.112	2224851.88
M₁₂ A	580175.131	2223371.27
M₁₃ F	580821.834	2219805.29
M₁₄ F	581186.966	2224353.51

Se eligieron 4 sitios representativos para la posterior excavación de perfiles de suelos para la toma de muestras dentro del área, de la cabecera municipal de Acaxochitlán, Hidalgo a una altitud que va de de 2100 - 2335.0 msnm. Como se muestra en la Figura 6.9

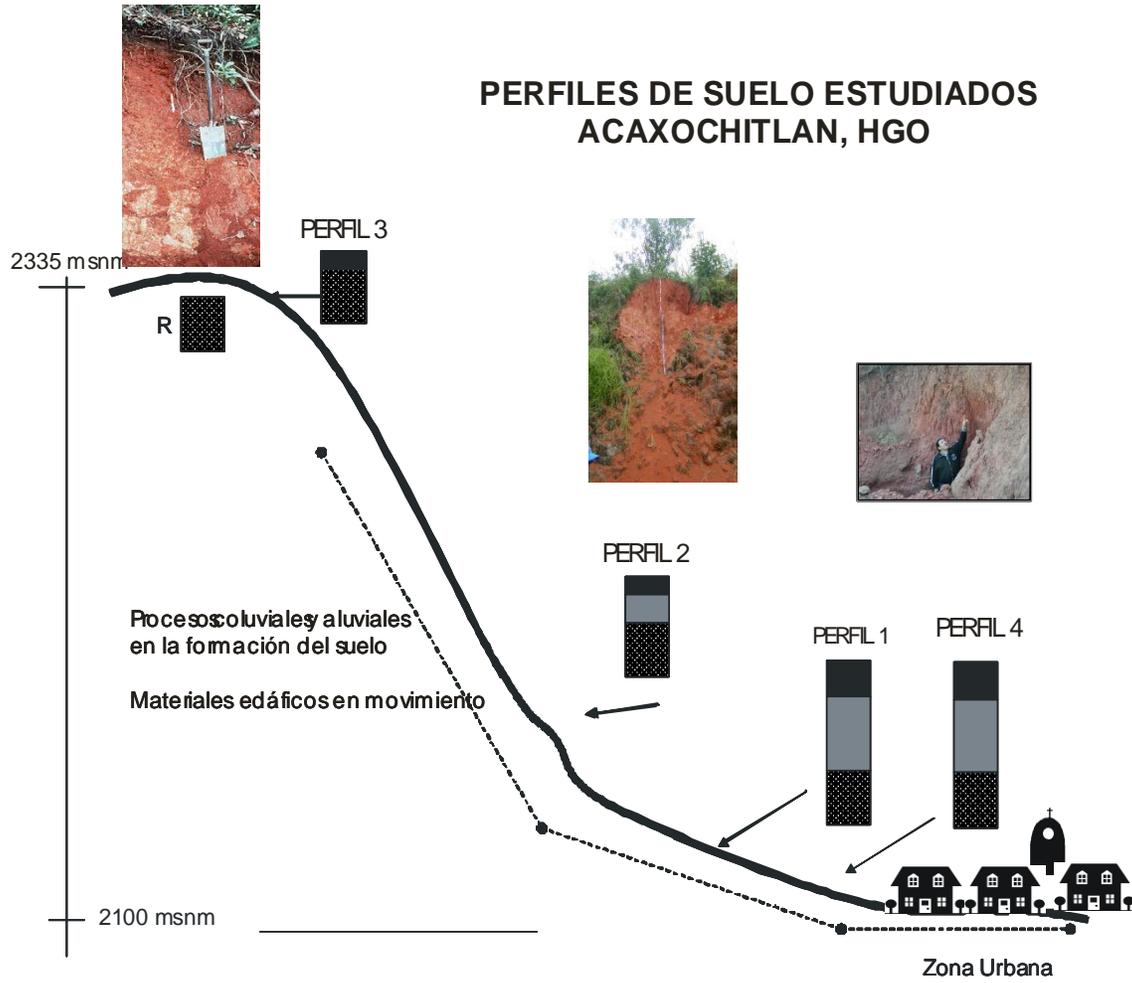


Figura 6.9. Distribución altitudinal de perfiles escavados en la porción sureste del estado de Hidalgo

6.6. *Análisis Químico del Suelo.*

6.6.1. *Caracterización química*

Para la caracterización química de los suelos agrícolas y de los perfiles, se utilizaron los métodos de análisis descritos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios mutros y análisis). Los parámetros caracterizados fueron:

- pH (H₂O, KCl)
- % Materia orgánica
- % Carbono orgánico
- Capacidad de Intercambio Catiónico
- Cationes intercambiables (Na, K, Ca y Mg)
- Aluminio intercambiable se determinó de acuerdo a Métodos Químicos para el Análisis de Suelos Ácidos y Plantas Forrajeras (Salinas *et al.*, 1985). El Al presente en la disolución así como las bases intercambiables se determinaron mediante espectrometría de emisión en plasma de inducción acoplado, (ICP) marca Perkin Elmer 3000 modelo Lambda 2S, todos los análisis se realizaron por triplicado.

6.6.2. *Extracción química selectiva.*

- La extracción de óxidos libres de Si, Al, Fe y óxidos cristalinos de Fe se llevó a cabo empleando el método de extracción con ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra y Jackson, 1960)
- La extracción de óxidos amorfos y óxidos hidratados de Al, Fe y Si se realizó con oxalato ácido de amonio (Smith, 1994)
- La extracción de Al, Fe y Si presentes en complejos orgánicos se hizo con pirofosfato de sodio (Smith, 1994).
- Los óxidos de Si, Al y Fe presentes en la disolución se determinó mediante espectrometría de emisión en plasma de inducción acoplado, (ICP) marca

Perkin Elmer 3000, modelo Lamda 2S.

6.7 Formulación de Índices de Calidad Ambiental Locales.

Se aplicara un Índice de Calidad Ambiental mediante la agregación de indicadores utilizando el modelo PER, Presión, Estado y Respuesta (Cantú *et al.*, 2003). Además, se evaluaron parámetros del suelo como potenciales indicadores de calidad aplicando el modelo PER e incorporando un modelo que contempla las funciones del ajuste bajo normalización de indicadores como lo establece Cantu (Cantú *et al.*, 2001; Cantú *et al.*, 2002). De lo anteriormente expuesto se desprende la necesidad de contar con un grupo mínimo de indicadores de calidad de suelos, de simple medición y con validez local como lo establece la metodología descrita en el capítulo 4, que pueda ser utilizado por dependencias gubernamentales (SAGARPA, SEMARNAT y COEDE) y responsables del manejo del suelo en la evaluación y seguimiento en el tiempo de la calidad de este recurso.

6.8. Patrones de meteorización diagramas A-CN-K

La proporción molar de Al_2O_3 (A), $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}$ (CN) y K_2O (K) en los suelos y el promedio de la composición de los perfiles son clasificadas en los diagramas ternarios A-CN-K de Nesbitt and Young (1984, 1989), esto para comprender la tendencia del intemperismo químico y la posible fuente de la composición de la roca. CaO^* es definido como CaO en fragmentos silicatos. Detalles de los cálculos son proporcionados por Nesbitt and Young (1982, 1989). Plagioclasa (Pl) y feldespato-K (Ks) graficados a 50 % Al_2O_3 en el punto de unión A-CN y A-K respectivamente. La línea de unión de la plagioclasa y el feldespato-K es llamada "línea de feldespatos". Illita (Il) y muscovita (Mu) graficados en la línea A-K entre 75 y 85% de Al_2O_3 y smectita (Sm) graficados en la línea A-CN con 75-85 % de Al_2O_3 . El otro grupo de minerales de arcilla ejemplo caolinita (Ka), gibbsita (Gi) y clorita (Ch) graficados al 100 % de Al_2O_3 en el vértice A del diagrama.

CAPITULO 7

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

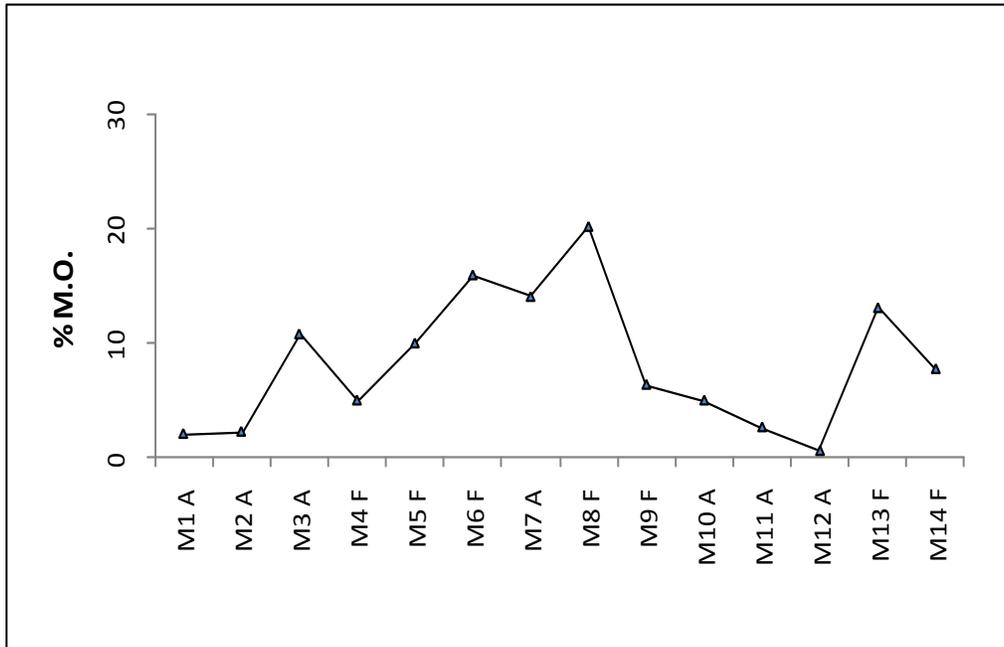
7.1. Propiedades químicas de los suelos superficiales estudiados.

Los valores de los parámetros químicos evaluados en 14 muestras de suelos superficiales de terrenos agrícolas y aledaños a suelos forestales se presentan en la Tabla 7.1; cada valor resultado del promedio de tres repeticiones procesadas en el Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICT). Los valores obtenidos del análisis muestran que para el pH KCl 1:2.5 muestran un valor promedio de 4.61 clasificados de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, fuertemente ácido, el conjunto de muestras vario de 4.14 para la muestra M₂A a 5.71 para la muestra M₁₂A, los dos valores corresponden a muestras de suelos agrícolas, así mismo se observa relativa homogeneidad en todas las muestras sin una marcada diferencia entre las muestras agrícolas y forestales. De acuerdo con Jhonson (2000) los suelos con pH's bajos tiene estrecha relación con suelos con altos contenidos de materia orgánica ya que al comúnmente al liberarse grupos carboxilos se ionizan algunos sitios y liberan H⁺ contribuyendo a los pH's ácidos.

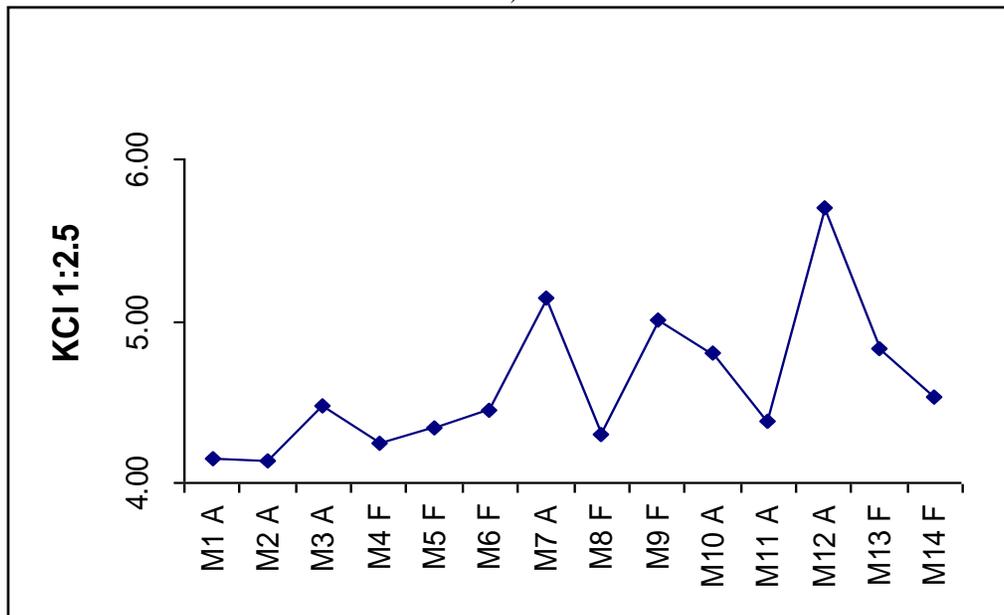
7.1.1. % Materia Orgánica

El porcentaje de materia orgánica varia significativamente de 0.57 a 20.24 % correspondiente a la muestras M₁₂A de M8F estableciéndose con una diferencia muy marcada por los extremo mínimo y máximo, el promedio de los 14 puntos se marca de 8.28 siendo este resultado clasificado como medio dentro de la clase media de los valores de referencia de materia orgánica para suelos volcánicos, esto en base al origen y geología de la zona de estudio, los valores relativamente más altos corresponden a muestras extraídas de predios donde se mantiene aun en pie actividad forestal y lo valores medianamente altos, corresponden a suelos agrícolas de 1 a 4 años de cambio de uso de suelo de

forestal a agrícola y los valores más bajos corresponden a los suelos agrícolas con uso intensivo y abandono como en caso de la muestra M₁₂A donde se registra el valor más bajo para este rubro.



a)



b)

Figura. 7.1. a) % Materia orgánica y b) valores de pH en KCl para 14 muestras procesadas en la zona de estudio.

Tabla 7.1. Propiedades químicas de suelos de la porción sureste del estado de Hidalgo.

MUESTRA	pH		M. O.	C org.	**CIC	Na	K	Ca	Mg	Saturación de bases
	H ₂ O 1:2.5	KCl 1:2.5	(%)			(cmol.kg ⁻¹)			%	
M ₁ A	5.27	4.15	2.07	1.20	20.24	0.49	0.94	0.60	2.81	23.93
M ₂ A	5.12	4.14	2.26	1.31	25.40	0.46	1.73	0.75	4.49	29.25
M ₃ A	5.48	4.47	10.81	6.28	36.24	0.42	1.53	1.17	5.52	23.87
M ₄ F	5.18	4.24	5.00	2.90	26.56	0.43	0.88	0.82	0.38	9.44
M ₅ F	5.25	4.34	10.01	5.80	14.72	0.27	0.50	0.54	2.94	28.89
M ₆ F	5.40	4.44	15.99	9.27	25.36	0.39	0.50	0.63	2.96	17.67
M ₇ A	5.89	5.15	14.09	8.18	22.80	0.32	0.56	1.26	6.32	37.11
M ₈ F	5.16	4.30	20.24	11.74	26.32	0.30	0.14	0.43	0.43	4.97
M ₉ F	5.82	5.00	6.38	3.70	15.92	0.28	0.46	0.92	3.71	33.73
M ₁₀ A	5.67	4.80	5.00	2.90	17.04	0.26	0.27	0.49	2.04	17.94
M ₁₁ A	5.51	4.39	2.65	1.53	15.28	0.26	0.44	0.69	1.85	21.18
M ₁₂ A	6.47	5.71	0.57	0.33	21.12	0.39	2.03	1.08	4.19	36.40
M ₁₃ F	5.89	4.84	13.11	7.60	30.16	0.32	1.07	1.14	5.30	25.93
M ₁₄ F	5.31	4.53	7.76	4.50	20.00	0.26	0.28	0.85	1.43	14.06

**** Capacidad de Intercambio Cationico**

7.1.2. Capacidad de intercambio cationico.

Con respecto a la capacidad de intercambio cationico, el valor promedio de las 14 muestras es 22.65, clasificado como clase media para estos suelos, atribuyendo bajas propiedades de reserva nutricional, ya que se considera como $25.0 \text{ cmol.kg}^{-1}$ como parámetro para considerar tal propiedad, el rangp de variación de estos suelos va de 14.72 a $36.24 \text{ cmol.kg}^{-1}$ siendo el mínimo la muestra M₅F de predio forestal el punto M₃A y el máximo correspondiente a muestra de predio agrícola y. Figura 7.2.

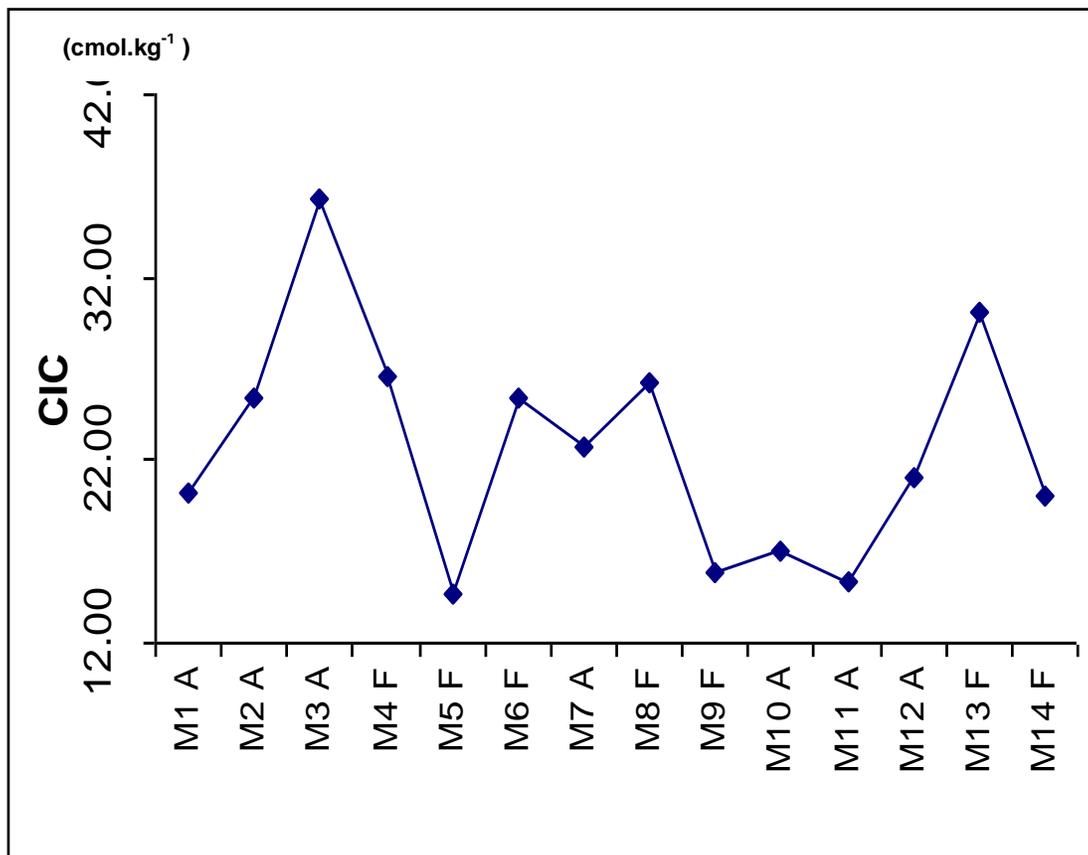


Figura. 7.2. a) Capacidad de Intercambio Cationico para 14 muestras procesadas en la zona de estudio.

7.1.3. % Carbono Orgánico.

Los valores registrados para carbono orgánico se promedian en 4.80 comportándose de manera similar a la materia orgánica, con una diferencia muy marcada en sus extremos mínimos y máximos, los cuales van de 0.33 a 11.74 los gráficos se observan con comportamiento similar. La variación esperada en las muestras forestales con respecto de las agrícolas no es muy marcada, ya que al parte de la materia orgánica cuantificada ya se encuentra incorporada a el suelo en formas húmicas o fulvicas.

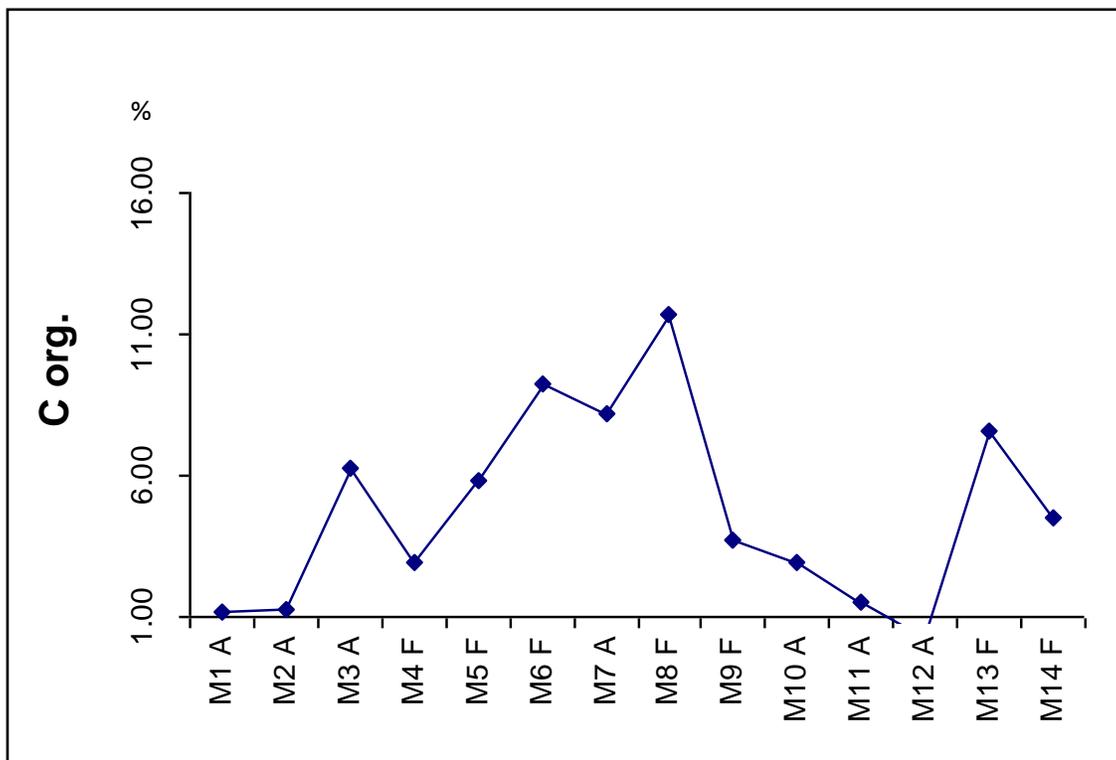
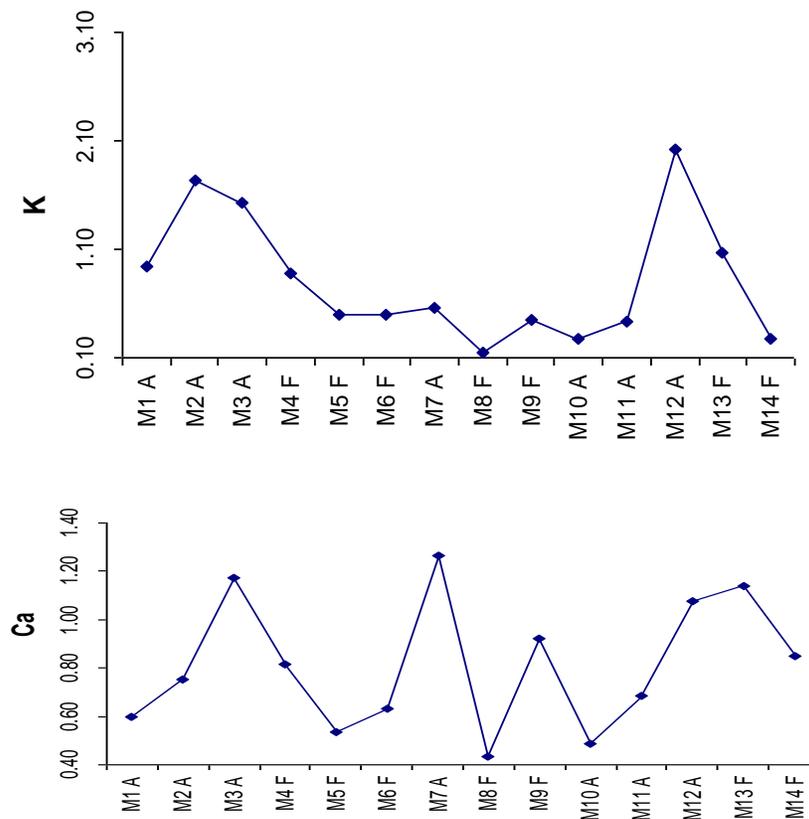


Figura. 7.3. Distribución de valores de % C org. para 14 muestras procesadas en la zona de estudio.

7.1.4. Bases intercambiables y % saturación de bases.

Los valores promedios 0.35,0.81,0.81 y 3.17, de sodio, potasio, calcio y magnesio respectivamente, se clasifican como bajos para los cuatro rubros para las 14 muestras procesadas, los valores mínimos y máximos, varían de 0.26 a 0.49, 0.14 a 2.03,0.43 a 1.26 y 0.38 a 6.32 para los antes mencionados de acuerdo con algunos autores, que señalan que la mayoría de los suelos ácidos presenta desbasificación dada la capacidad de intercambio promovida por los pH's ácidos que se registran de tal manera que para posibles manejos se recomienden enmiendas con la restitución de algunas cargas de calcio y magnesio en forma de CaCO_3 (caliza y/o dolomita) dadas las necesidades de magnesio.



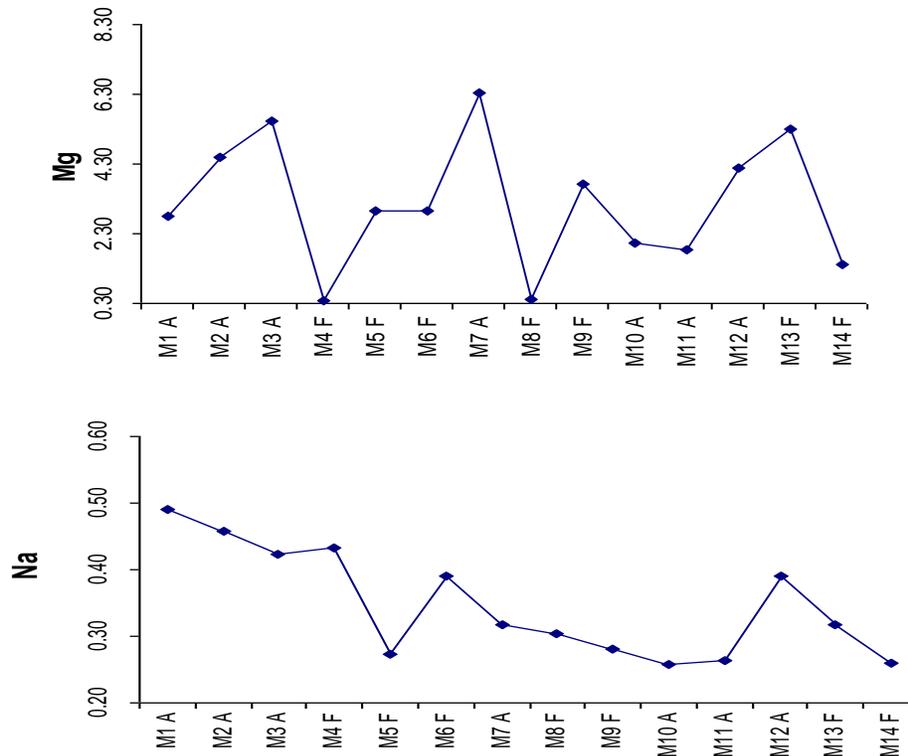


Figura. 7.4. Distribución de valores de potasio (K), calcio (Ca) , magnesio(Mg) y sodio (Na) para 14 muestras procesadas en la zona de estudio.

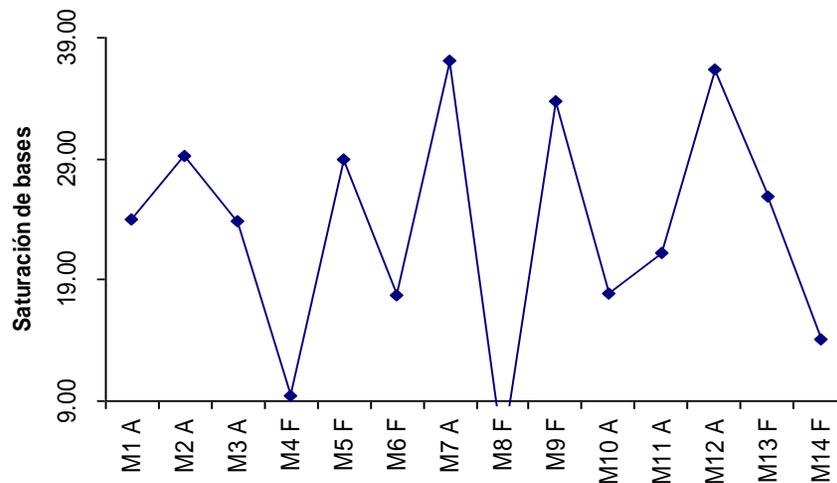


Figura. 7.5. Distribución de valores de % de saturación de bases para 14 muestras procesadas en la zona de estudio.

7.2. *Propiedades Químicas de Perfiles de suelo.*

Se presentan los valores para algunas propiedades químicas de los cuatro perfiles. Los resultados de la Tabla 7.2 y 7.3 indican que los Perfiles 2 y 4 tienen un alto contenido de materia orgánica en los horizontes superficiales, el Perfil 3 se considera medio y muy bajo para el Perfil 2, el porcentaje de materia orgánica decrece con la profundidad del suelo hasta llegar a valores considerados como muy pobres (Aguilar-Santelises, 1988), el contenido de carbono orgánico es muy alto en los primeros horizontes, y tiende a disminuir al aumentar la profundidad del suelo. El suelo cultivado (Perfil 3) presentó un epipedón úmbrico debido al contenido de materia orgánica, lo anterior sugiere una reciente incorporación de ese terreno a la agricultura.

El pH 1:2.5 varió de 6.7 a 4.9, de ligeramente ácido a muy ácido, con una ligera disminución de acidez al aumentar la profundidad en el Perfil 2, en los otros tres perfiles se presenta un incremento de la acidez con relación a la profundidad del suelo, éstos resultados coinciden con lo reportado por Porta *et al.* (1994), la acidez generalmente aumenta con la profundidad en áreas de alta precipitación. Lilienfein *et al.* (2000) y Brady y Weil (1999) mencionan que las coníferas incrementan la acidez del suelo y, asociada con ésta, se alteran procesos edáficos como: hidrólisis ácida, lixiviación de cationes básicos, nitrificación y actividad fúngica.

Los suelos con altos contenidos de materia orgánica pueden tener a la vez una mayor CIC y pH's bajos, debido a que la materia orgánica contiene una gran cantidad de grupos carboxilos (R-COOH) lo cual resulta de una alta densidad de sitios ionizados y la liberación de H⁺ y por consecuencia pH's ácidos (Johnson, 2002). Zapata (2004) menciona que la acidez incide directamente en la fertilidad de los suelos, ocasionando un mayor o menor grado de solubilidad de los elementos nutrimentales para las plantas y afectando de este modo la producción agrícola y forestal.

En relación a las bases intercambiables el calcio, magnesio y potasio presentan valores bajos a muy bajos en los Perfiles 2, 3 y 4, estos valores pueden ser considerados como un nivel crítico. El Perfil 1 muestra contenidos altos de cationes intercambiables (Tabla 7.2). El porcentaje de saturación de bases es mayor del 50% en el Perfil 1 y la tendencia de ésta fue disminuir con la profundidad del suelo, mientras que, en los Perfiles 2, 3 y 4 es menor del 20%, incrementándose éstas con relación a la profundidad del suelo, lo cual indica un grado de desaturación o eliminación de bases por lixiviación y lavado del suelo. El mayor porcentaje de bases en el Perfil 1 se debe posiblemente al tipo de vegetación presente (*Quercus* spp) ya que el proceso de descomposición de las hojas de los árboles caducifolios causada por lombrices, bacterias y las condiciones climáticas, por lo general es mas rápida y puede efectuarse en el curso de un año a diferencia de las coníferas que tardan de siete a diez años (Fitzpatrick, 1978), liberándose los compuestos minerales de la materia orgánica, acumulándose éstos en los horizontes superficiales.

La capacidad de intercambio catiónico en general se puede considerar alta (promedio de $30 \text{ Cmol}+\text{kg}^{-1}$), lo que se atribuye, en gran parte, a la presencia de sesquióxidos (Johnson, 2002), al contenido de materia orgánica y a la naturaleza de las arcillas (Dixon, 2000). Takahashi *et al.* (2001) mencionan que al presentarse un desorden en la estructura cristalina de la haloisita, ésta puede ser responsable de una mayor área superficial y de la capacidad de intercambio catiónico. Johnson *et al.* (2000) reportan que en suelos forestales de Nueva Inglaterra y del noreste de USA (Johnson, 2002) la materia orgánica es la fuente predominante de sitios de intercambio, lo que muestra el alto grado de transformación y evolución de la materia orgánica de esos suelos. Meyer y Arp (1994) reportan que en suelos forestales ácidos, al determinar la capacidad de intercambio catiónico con NH_4OAc 1N (pH, 7.0) tiende a exceder los resultados, situación que prevaleció en el presente trabajo. Li *et al.* (1998) concluyen que la capacidad de intercambio catiónico de suelos forestales de Taiwán es influenciada primeramente por la cantidad de materia orgánica, los minerales de rango corto y los contenidos de arcilla en el suelo. La fertilidad potencial de los suelos

estudiados es moderada, debido principalmente a la limitada presencia de cationes básicos intercambiables.

Tabla 7.2. Propiedades químicas de perfiles de suelos 1 y 2 de la porción sureste del estado de Hidalgo.

Suelo	pH		Saturación de bases %	CIC Cmol. Kg ⁻¹	Cationes intercambiables cmol Kg ⁻¹				Corg %	M. O. %
	H ₂ O1:2.5	KCl 1:2.5			Na	K	Ca	Mg		
Perfil 1										
0-9	6.25	4.53	56.28	41.4	1.31	2.06	16.84	3.09	2.22	3.82
9-37	6.62	5.61	68.32	36.8	0.68	1.14	19.49	3.83	0.79	1.36
37-50	6.70	4.90	47.87	36.2	1.34	1.14	12.55	2.30	1.22	2.1
> 50	5.52	4.23	3.25	42.8	0.83	0.20	0.27	0.09	0.08	0.13
Perfil 2										
0-12	4.94	4.10	8.41	17.60	0.93	0.17	0.30	0.08	9.40	16.21
12-22	5.13	4.27	7.63	23.60	1.08	0.24	0.37	0.11	9.01	15.53
22-38	5.13	4.19	11.94	17.00	1.07	0.47	0.39	0.11	4.00	6.90
38-69	5.20	4.43	10.57	17.60	1.02	0.34	0.40	0.11	3.93	6.78
69-100	5.18	4.15	13.97	11.60	0.86	0.21	0.44	0.11	1.86	3.21
> 100	5.15	4.24	14.89	8.80	0.73	0.17	0.30	0.11	1.62	2.80

Corg=Carbono orgánico

CIC= Capacidad de Intercambio catiónico

Tabla 7.3.- Propiedades químicas de perfiles suelos 3 y 4 de la porción sureste del estado de Hidalgo.

Suelo	pH		Saturación de bases %	CIC cmol Kg ⁻¹	Cationes intercambiables cmol Kg ⁻¹				Corg %	M. O. %
	H ₂ O1:2.5	KCl1:2.5			Na	K	Ca	Mg		
Perfil 3										
0-9	5.48	4.46	17.83	31.40	0.45	2.46	2.03	0.66	6.02	10.37
9-22	5.49	4.48	13.45	20.00	0.32	0.73	1.25	0.39	3.58	6.18
22-30	5.48	4.47	11.27	24.40	0.30	0.85	1.27	0.33	3.58	6.18
30-50	5.20	4.25	10.99	25.20	0.28	0.82	1.31	0.36	1.55	2.68
50-66	5.16	4.24	11.22	27.28	0.27	0.92	1.36	0.51	0.27	0.47
>66	5.18	4.23	10.75	28.00	0.23	0.90	1.38	0.50	0.41	0.70
Perfil 4										
0-8	6.29	4.78	9.91	44.00	0.35	0.65	2.31	1.05	7.64	13.17
8-17	5.95	4.50	11.19	26.00	0.23	0.45	1.40	0.83	3.52	6.06
17-64	5.98	4.62	13.76	17.00	0.21	0.13	1.03	0.97	0.27	0.47
64-86	6.15	4.58	8.88	25.00	0.27	0.14	0.88	0.93	0.27	0.47
>86	6.00	4.55	8.81	25.20	0.27	0.12	0.87	0.96	0.07	0.12

Corg=Carbono orgánico

CIC= Capacidad de Intercambio catiónico

7.3. Índices de calidad de suelos.

La normalización y ponderación de las variables seleccionadas Corg., pH, CIC, % M.O.y saturación de bases, muestran comportamientos variables de acuerdo a cada una de las muestras estudiadas, Fig. 7.6, este fenómeno obedece a la variabilidad espacial de cada una, donde cabe recordar que la integración de cada una de estas para determinar calidad del suelo y la clase a la que corresponde cada suelo es fundamental, por lo cual la interpretación aislada de cada índice de los valores seleccionados carece de valides, algunos de ellos muestran comportamientos inversos en su distribución sin obtener una información parcial de su verdadero significado en la apreciación.

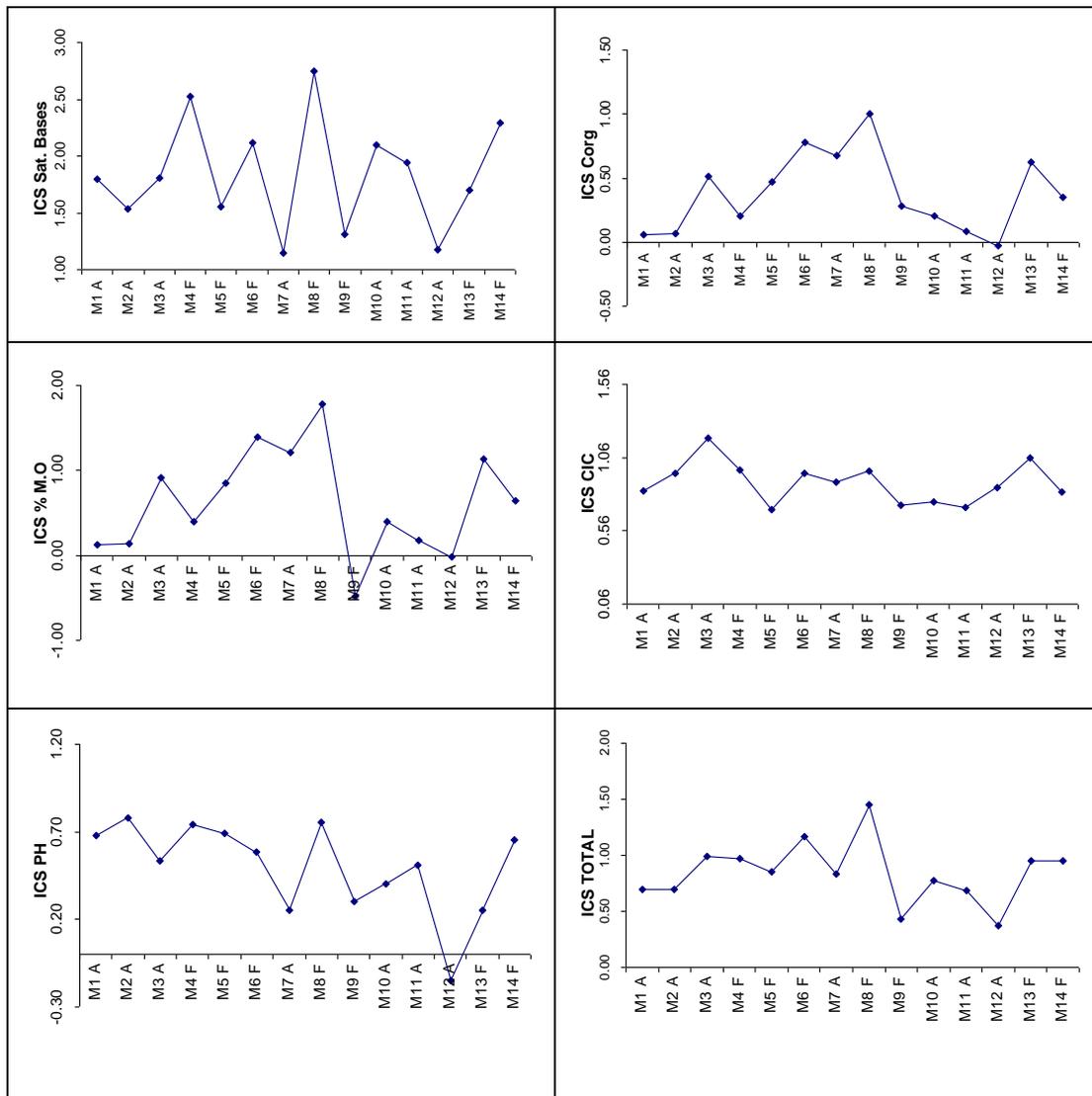


Figura. 7.6. Distribución de Índices de calidad de suelos generados a partir de la normalización y ponderación de las variables seleccionadas; de 14 muestras procesadas en la zona de estudio.

Tabla 7.4.-Estandarización de indicadores seleccionados para valores $V_n=1$ y $V_n=0$ de I_{max} y $I_{min.}$, de % Corg., Sat. Bases, % de M.O.

$V_n=1$ Corg.	$V_n=0$ Corg	ICS Corg.	$V_n=1$ Sat. Bases	$V_n=0$ Sat. Bases	ICS Sat. Bases	$V_n=1$ % M.O.	$V_n=0$ % M.O.	ICS % M.O.
0.05	-1.22	0.05	-2.02	1.58	-0.22	0.06	0.19	0.13
0.06	-1.62	0.06	-1.61	1.46	-0.07	0.07	0.22	0.14
0.51	-20.03	0.51	-2.03	1.58	-0.22	0.51	1.33	0.92
0.21	-7.52	0.21	-3.15	1.90	-0.62	0.21	0.57	0.39
0.47	-18.27	0.47	-1.64	1.47	-0.08	0.47	1.22	0.85
0.78	-31.12	0.78	-2.51	1.72	-0.40	0.78	2.00	1.39
0.68	-27.06	0.68	-1.00	1.29	0.14	0.68	1.75	1.22
1.00	-40.27	1.00	-3.49	2.00	-0.75	1.00	2.55	1.78
0.28	-10.48	0.28	-1.26	1.36	0.05	0.28	-1.25	-0.48
0.21	-7.52	0.21	-2.49	1.71	-0.39	0.21	0.57	0.39
0.08	-2.46	0.08	-2.24	1.64	-0.30	0.09	0.27	0.18
-0.02	1.99	-0.02	-1.06	1.30	0.12	-0.02	0.00	-0.01
0.63	-24.94	0.63	-1.87	1.53	-0.17	0.63	1.63	1.13
0.35	-13.46	0.35	-2.79	1.80	-0.50	0.35	0.93	0.64

Tabla 7.5.- (Complemento de tabla 7.4) Estandarización de indicadores seleccionados para valores $V_n=1$ y $V_n=0$ de I_{max} y $I_{min.}$, de pH H_2O y CIC.

$V_n=1$ PH	$V_n=0$ PH	ICS PH	$V_n=1$ CIC	$V_n=0$ CIC	ICS CIC
-0.27	1.63	0.68	-0.18	1.84	0.83
-0.44	2.00	0.78	0.20	1.70	0.95
-0.05	1.11	0.53	1.00	1.39	1.20
-0.37	1.85	0.74	0.29	1.66	0.98
-0.29	1.68	0.69	-0.58	2.00	0.71
-0.14	1.31	0.59	0.20	1.70	0.95
0.39	0.11	0.25	0.01	1.77	0.89
-0.39	1.90	0.75	0.27	1.67	0.97
0.31	0.29	0.30	-0.50	1.97	0.74
0.15	0.66	0.40	-0.41	1.93	0.76
-0.02	1.04	0.51	-0.54	1.98	0.72
1.00	-1.30	-0.15	-0.11	1.82	0.85
0.38	0.13	0.25	0.55	1.56	1.06
-0.23	1.54	0.65	-0.19	1.85	0.83

Es importante resaltar que dentro los resultados de índices de calidad que se presentan la saturación de bases juega un papel importante dado que sus índices para las 14 muestras se ve afectado considerablemente, por la baja concentración de bases intercambiables de la misma forma que la capacidad de intercambio que presenta una clasificación media, en estos suelos.

7.3.1. Clasificación de muestras de acuerdo a su calidad.

Una vez integrados los valores bajo promediar el total de indicadores de calidad ambiental, se obtiene los **índices de calidad ambiental**, los cuales en el presente estudios, se muestra la clasificación de 14 muestras donde 8 de las muestras clasificadas corresponden a la clase de Muy alta calidad, 4 de alta calidad y sólo 2 de Moderada calidad como se aprecia en la **Tabla 7.6**.

Tabla 7.6.- Índices de Calidad de Suelo y clasificación en base a los criterios generados.

MUESTRA	ICS CIC	ICS Corg.	ICS Sat. Bases	ICS M.O.	ICS PH	ICS CIC	ICS TOTAL	CLASE
M ₁ A	0.83	0.05	1.80	0.13	0.68	0.83	0.72	2
M ₂ A	0.95	0.06	1.54	0.14	0.78	0.95	0.74	2
M ₃ A	1.20	0.51	1.80	0.92	0.53	1.20	1.03	1
M ₄ F	0.98	0.21	2.52	0.39	0.74	0.98	0.97	1
M ₅ F	0.71	0.47	1.55	0.85	0.69	0.71	0.83	1
M ₆ F	0.95	0.78	2.11	1.39	0.59	0.95	1.13	1
M ₇ A	0.89	0.68	1.14	1.22	0.25	0.89	0.85	1
M ₈ F	0.97	1.00	2.75	1.78	0.75	0.97	1.37	1
M ₉ F	0.74	0.28	1.31	-0.48	0.30	0.74	0.48	3
M ₁₀ A	0.76	0.21	2.10	0.39	0.40	0.76	0.77	2
M ₁₁ A	0.72	0.08	1.94	0.18	0.51	0.72	0.69	2
M ₁₂ A	0.85	-0.02	1.18	-0.01	0.15	0.85	0.45	3
M ₁₃ F	1.06	0.63	1.70	1.13	0.25	1.06	0.97	1
M ₁₄ F	0.83	0.35	2.29	0.64	0.65	0.83	0.93	1

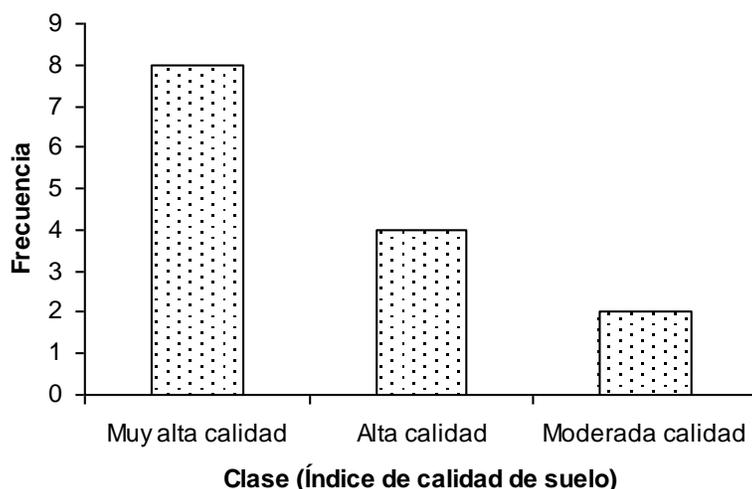


Figura 7.7. Frecuencia de Índices de calidad de suelos de 14 muestras procesadas en la zona de estudio.

7.4. *Patrones de meteorización diagramas A-CN-K*

Los patrones de meteorización fueron analizados utilizando los diagramas A-CN-K. Nesbitt y Young (1984, 1989)

En los 4 perfiles estudiados se observa en base a los valores de porcentaje en peso que los óxidos de CaO, Na₂O y K₂O se reducen considerablemente resultado de la meteorización y lixiviado el bases, estos comparados con la roca parental de referencia Tabla 7.7 (corteza continental superior) (Wedepohl; 1969,1974), y por el contrario las concentraciones de Al₂O₃, incrementan en los horizontes inferiores.

Los valores de CIA en las muestras de perfiles 1 y 3 se encuentran en el rango de 84.82 a 93.32 y de 91.52 a 93.77 respectivamente, en tanto que los valores en perfiles 2 y 4 son más altos y van desde 93.91 a 99.91 y 94.58 a 98.85.

Diferentes patrones de meteorización se observan en los diagramas A-CN-K para cada grupo de horizontes en los perfiles. Los índices de meteorización química presentan inconsistencia para algunas muestras fuertemente influenciadas por la presencia de sesquióxidos de aluminio .

Los resultados obtenidos sugieren que las condiciones de humedad en la porción sureste del estado han dominado por un periodo de tiempo amplio, promoviendo la alteración de materiales con altos índices de meteorización en las matrices de los suelos, independiente de su fuente. Las condiciones prolongadas de humedad y intensidad en lluvia, se considera que pueden ser las responsables de la meteorización y movilización (depositación y movimientos de suelo) (Aristizábal *et al.*2009).

Tabla 7.7.- Valores reportados para basalto y corteza terrestre superior.

ÓXIDOS TOTALES	BASALTO*	CORTEZA C.S.*
SiO ₂	39.15	48.1
TiO ₂	1.1	0.69
Al ₂ O ₃	23.2	22.82
Fe ₂ O ₃	18.07	11.94
MnO	0.14	0.09
MgO	5.45	2.96
CaO	7.36	4.59
Na ₂ O	3.74	4.82
K ₂ O	1.41	3.59
P ₂ O ₅	0.47	0.7

*(Wedepohl; 1969,1974)

Aristizábal *et al.* (2009) menciona que los movimientos de suelo y la meteorización química de sus materiales se caracteriza por el desarrollo de minerales de arcilla (caolinita, halloisita) y sesquióxidos de hierro y aluminio. Procesos de tendencia a la lateritización caracterizan las últimas fases de meteorización.

Tabla 7.8.- Valores de CIA (índice de Alteración Química) de los perfiles de suelo.

CIA			
PERFIL 1	CIA	PERFIL 3	CIA
0-9	86.09	0-9	91.52
9-37	84.82	9-22	92.97
37-50	90.71	22-30	92.82
> 50	93.32	30-50	93.77
		50-66	93.09
		> 66	92.92
PERFIL 2	CIA	PERFIL 4	CIA
0-12	93.91	0-8	94.58
12-22	98.10	8-17	96.88
22-38	99.26	17-64	98.31
38-69	99.27	64-86	98.6
69-100	99.91	> 86	98.85
> 100	99.85		

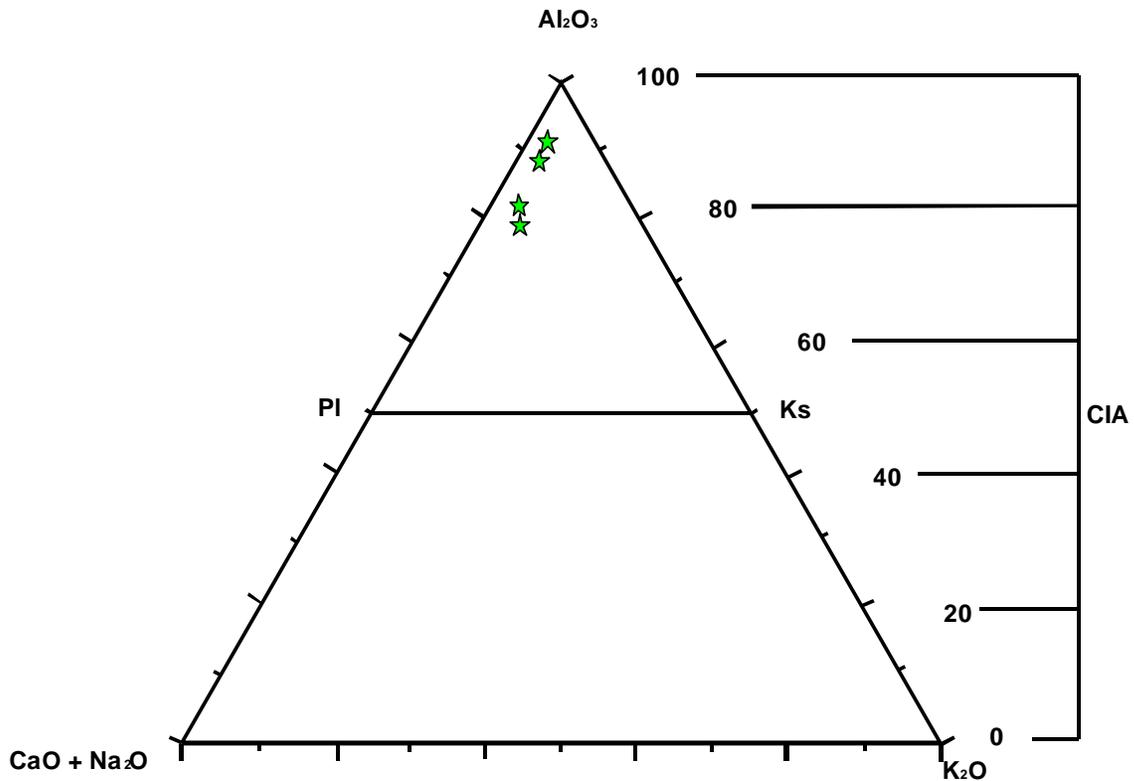


Figura 7.8.- Diagrama ternario A-CK-N de intemperismo químico Nesbitt y Young (1984, 1989), mostrando los valores de CIA para muestras del perfil 1.

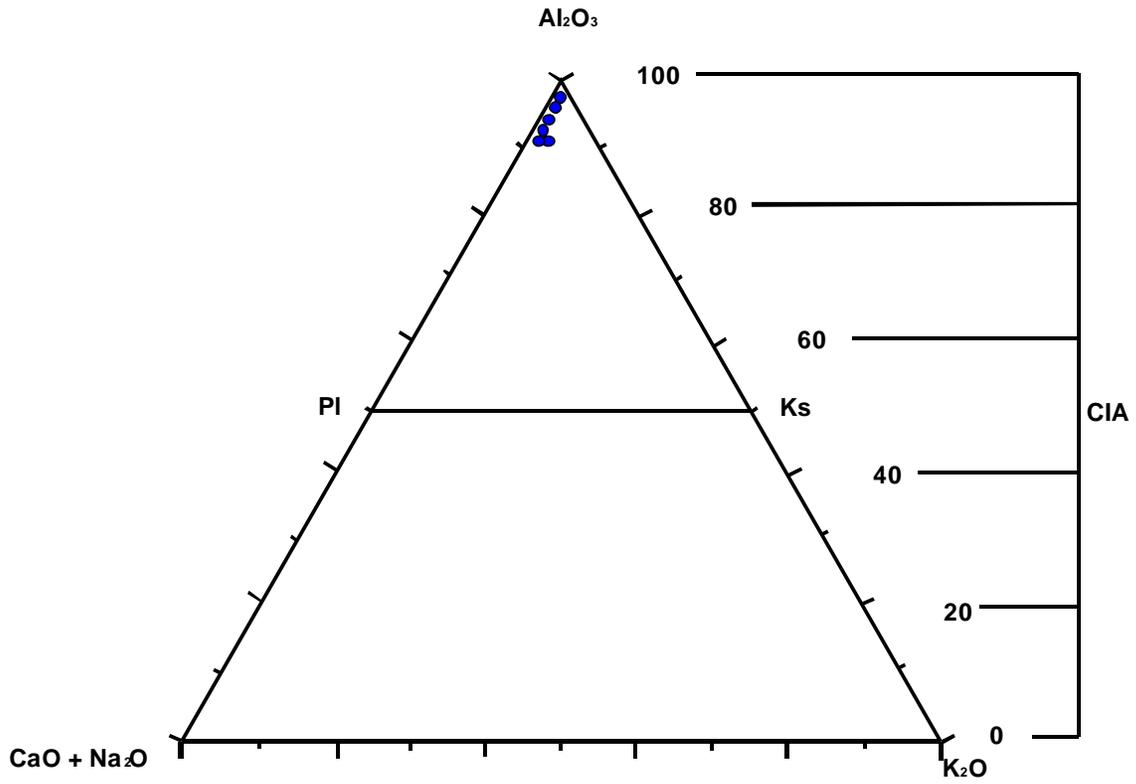


Figura 7.9.- Diagrama ternario A-CK-N de intemperismo químico Nesbitt y Young (1984, 1989), mostrando los valores de CIA para muestras del perfil 2

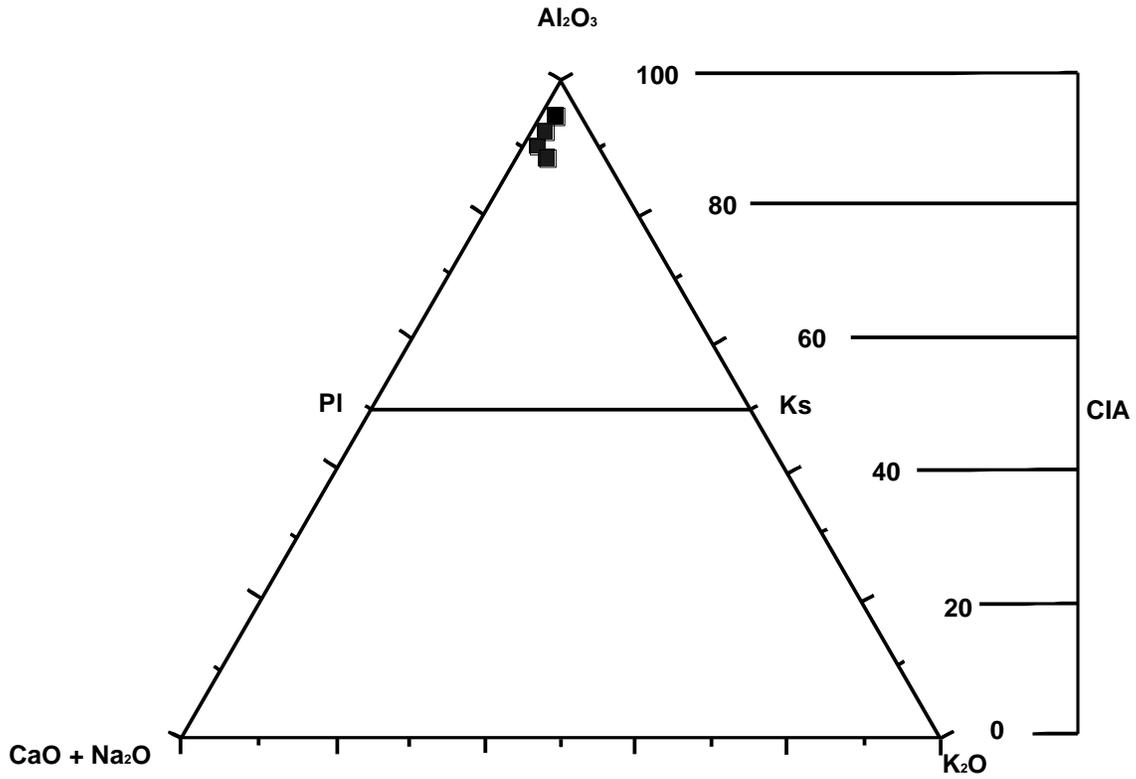


Figura 7.10.- Diagrama ternario A-CK-N de intemperismo químico Nesbitt y Young (1984, 1989), mostrando los valores de CIA para muestras del perfil 3.

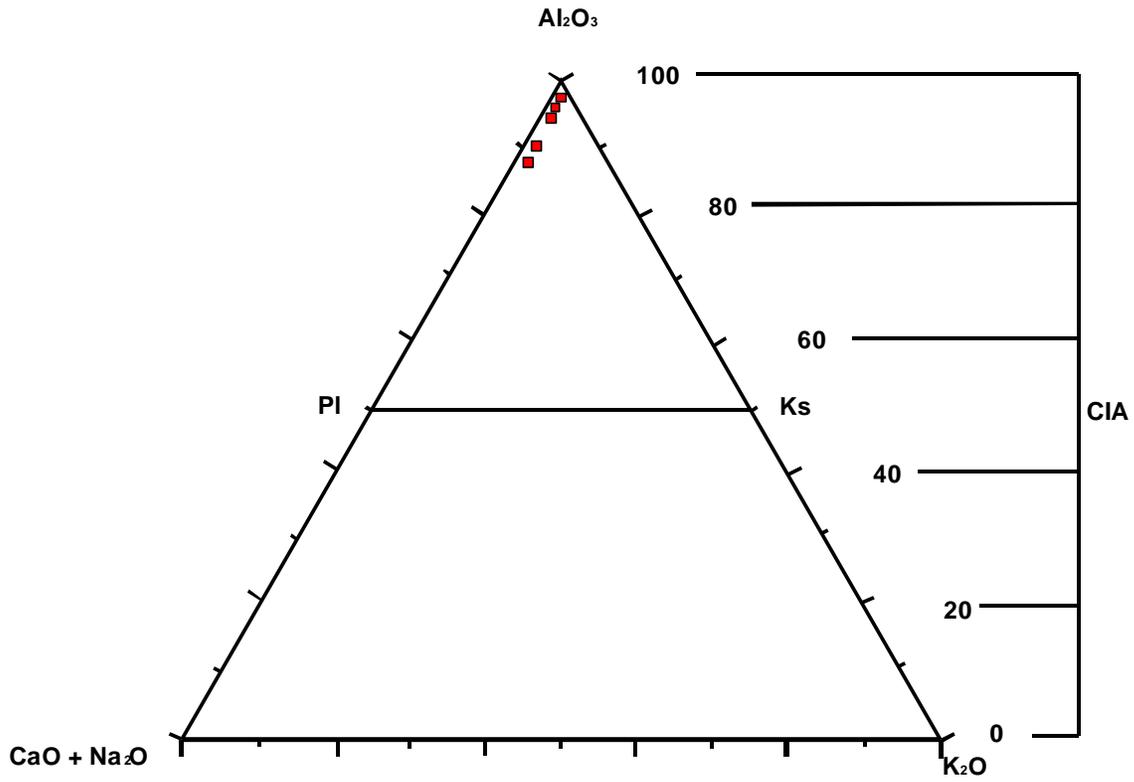
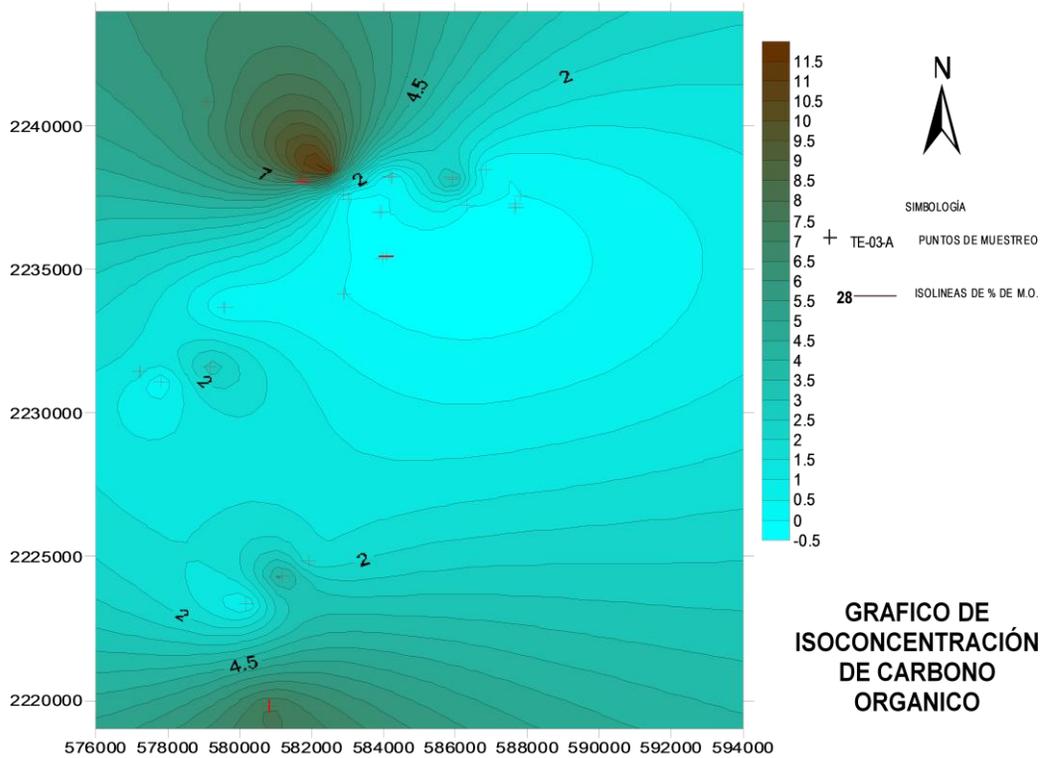
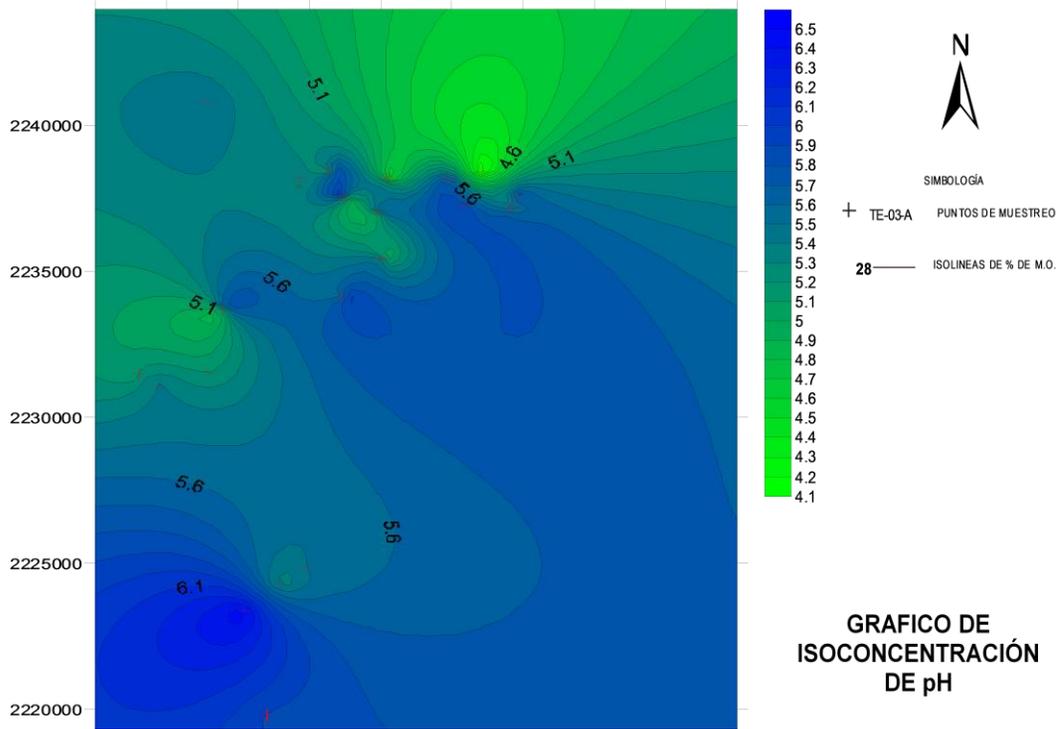


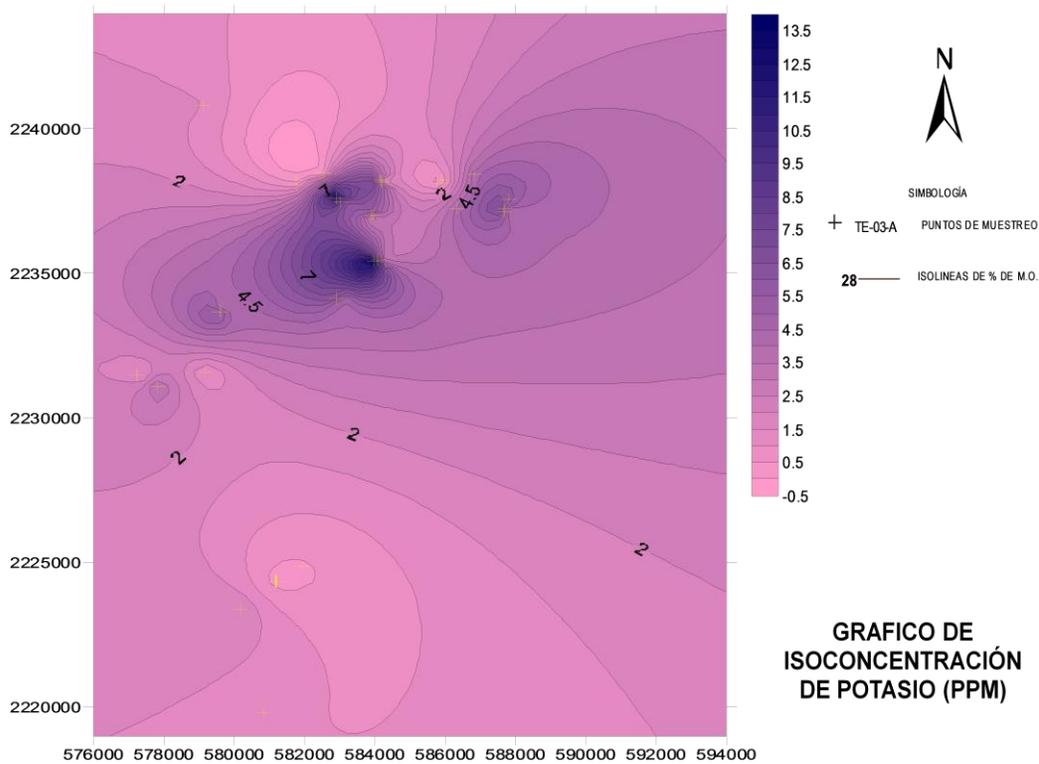
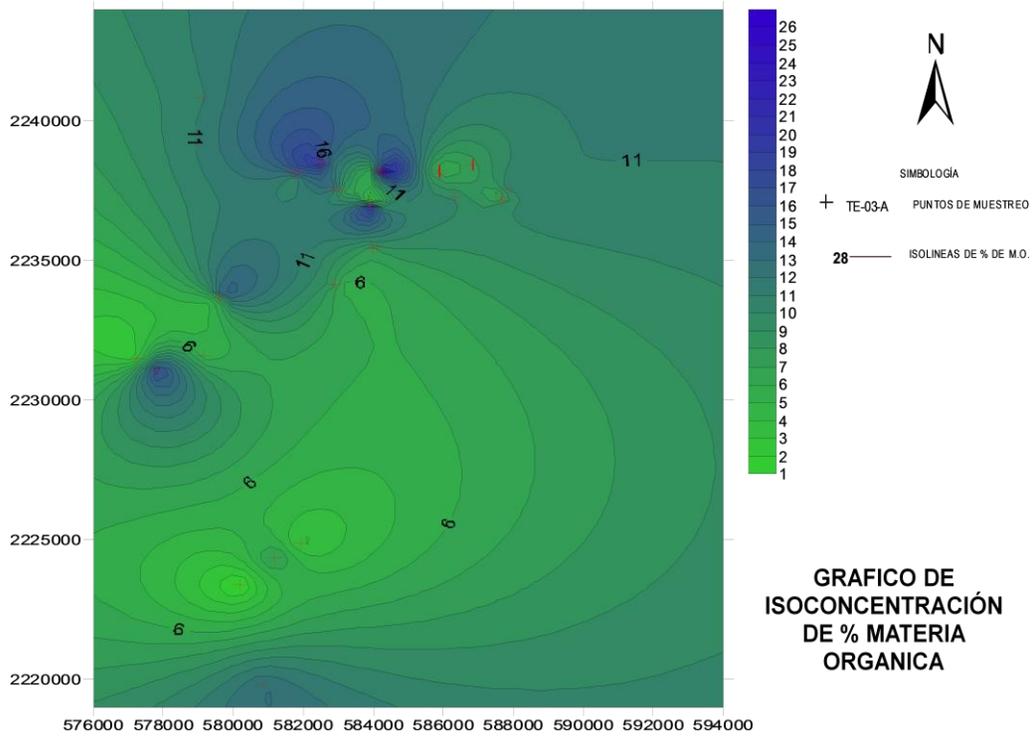
Figura 7.11.- Diagrama ternario A-CK-N de intemperismo químico Nesbitt y Young (1984, 1989), mostrando los valores de CIA para muestras del perfil 4.

7.5. Diagramas de distribución de isoconcentraciones.

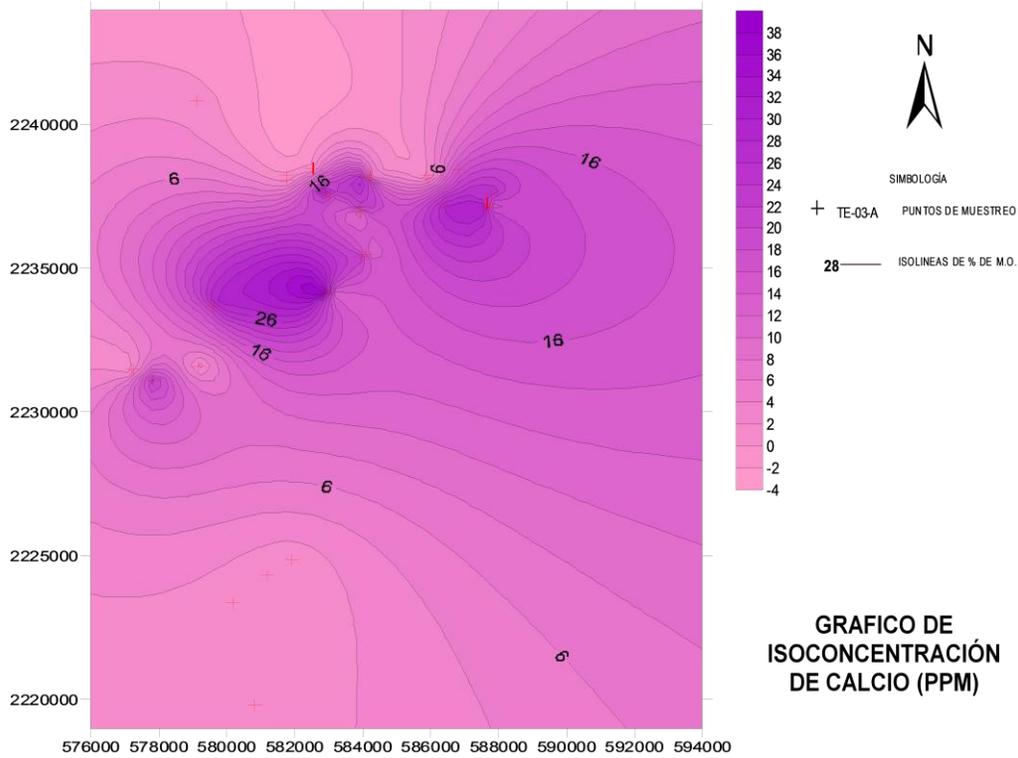
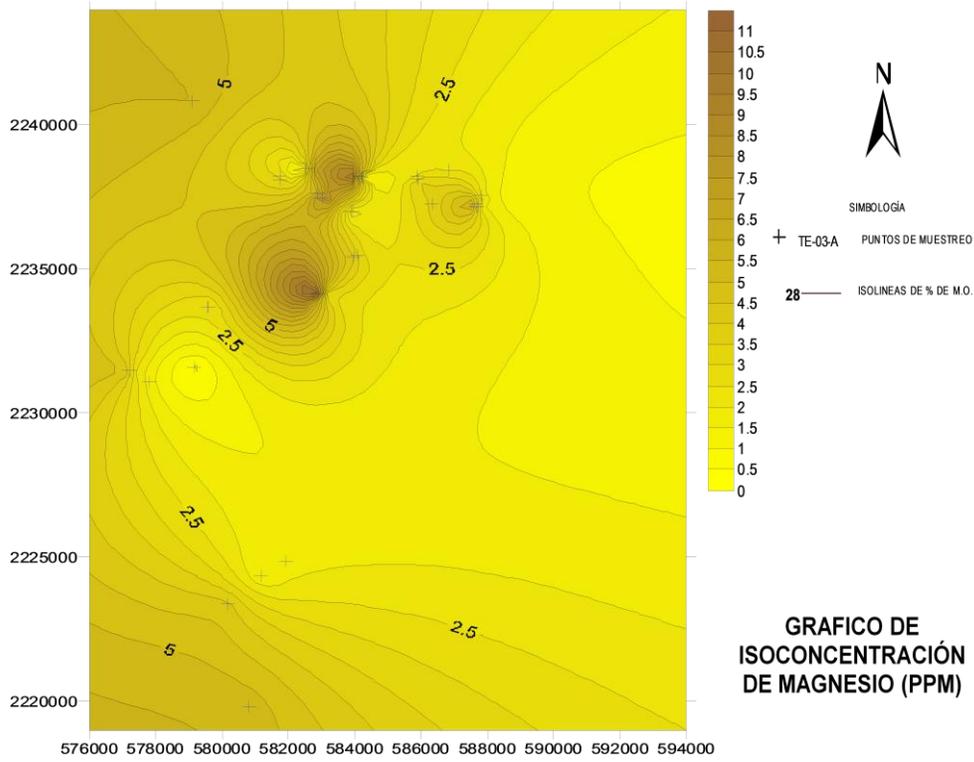
Los gráficos de distribución muestran el comportamiento en base a isoconcentraciones, basado en el método geoestadístico de interpolación de Kriging el cual básicamente, a través de modulaciones calcula parámetros donde no existen estaciones o bien de cara a suplir datos incompletos en aquellos lugares donde la información es inaccesible. Los Gráficos fueron realizados mediante la utilización del Software Surfer 8.



Figuras 7.12.- Grafico de isoconcentración de pH y Carbono Orgánico.



Figuras 7.13.- Grafico de isoconcentración de Potasio y % de Materia Orgánica.



Figuras 7.14.- Grafico de isoconcentración de Mg y Calcio

CONCLUSIONES.

1. Se identificaron y seleccionaron los indicadores de calidad para suelos ácidos, con ello optimizando y aplicando un set mínimo de pruebas químicas para la evaluación de los mismos.
2. Las características químicas de los suelos superficiales, evidencian la pérdida y migración de bases intercambiables, debido a las condiciones climáticas (lluvia) y de manejo (agricultura), que de manera histórica han sido expuestos estos suelos, aunado a la pérdida de cobertura vegetal resultado del cambio de uso del suelo en esta región.
3. Se ha realizado la evaluación categórica de la calidad de los suelos presentes en la porción suroeste del estado de Hidalgo, con la **generación de un Índice de Calidad Ambiental** con aproximación multicriterio de **indicadores** que otorga en cada caso, una importancia mayor a aquellos indicadores que tiene nivel explicativo superior de la capacidad del suelo para ofrecer cada servicio ambiental.
4. Se propone la utilización de Índices de calidad para suelos de tipo Acrisol para la porción sureste del estado de Hidalgo, México.
5. Se establece la categorización de calidad de 14 sitios dentro la porción sureste del estado de hidalgo, encontrando principalmente que estas se encuentran en las categorías, muy alta calidad (8), alta calidad (4) y 2 más en moderada calidad, pudiendo concluir, que los sitios se encuentran con potencialidad de regeneración en base a su vocación del suelo.
6. Los diagramas ternarios A-CK-N de intemperismo químico, evidencian la alteración de los materiales parentales de que derivan, al mismo tiempo se observan acumulaciones importantes de Al_2O_3 , en los horizontes

inferiores, pudiendo con ellos establecer que la acumulación de estos óxidos han sido resultado de la constante lixiviación de los horizontes superficiales.

7. Los resultados obtenidos sugieren que las condiciones de humedad en la porción sureste del estado han dominado por un periodo de tiempo amplio, promoviendo la alteración de materiales con altos índices de meteorización en las matrices de los suelos, independiente de su fuente. Las condiciones prolongadas de humedad y intensidad en lluvia, se considera que pueden ser las responsables de la meteorización y movilización (depositación y movimientos de suelo).

REFERENCIAS

- Acevedo-Sandoval O. A., Cruz-Chávez, E., Cruz-Sánchez, M., Gordillo-Martínez, A. 2005. Génesis de suelos ácidos. *Terra latinoamericana* (en prensa).
- Acevedo-Sandoval O. A., Osterrieth L Margarita., Cruz-Chávez Enrique., Cruz-Sánchez Misael., Valera-Pérez Miguel A., Prieto-García Francisco. 2008. Propiedades físicas, químicas y mineralógicas de suelos ácidos en el estado de Hidalgo, México *AGROCIENCIA* (en prensa)
- Acevedo-Sandoval, O. A. 2005. Aluminio, un indicador de calidad ambiental en suelos de carga variable. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Área Académica de Química.
- Acevedo-Sandoval, O. A. 2001. Acidez., XIX Curso Internacional de Edafología.
- Acevedo-Sandoval, O. A. 2001. Suelos ácidos., XIX Curso Internacional de Edafología.
- Acton, D.F. y L. J. Gregorich. 1995. The health of our soils: Toward sustainable agriculture in Canada. Centre for Land and Biological Resources Research. Research Branch. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, O.N. <http://res.agr.ca/CANSIS/PUBLICATIONS/HEALTH/>
- Abrahams, P.W. 2002. Soils: their implications to human health. *The Science of the total Environment*. 291:1-32.
- AGRIBOT, Chapingo; México. Universidad Autónoma Chapingo.
- Aguilar Santelises Andrés. 2005. Retos y oportunidades de la ciencia del suelo al inicio del siglo XXI. *Terra* 13: 13-16 p.
- Aguirre-Gómez, A. 2001. Química de los suelos ácidos, templados y tropicales. Facultad de Estudios superiores Cuautitlán, UNAM. México.
- Alam, S.M. 1981. Effects of solution pH on the growth and chemical composition of rice plants. *J. of Plant Nutr.* 4: 247 – 260.
- Aristizábal, E., Roser, B., Yokota, S. (2009). Patrones e índices de meteorización química de los depósitos de vertiente y rocas fuentes en el Valle de Aburrá. *Boletín de Ciencias de la Tierra* 25, 27-42.

- Arteta Régulo León. 1991. Nueva edafología regiones tropicales y áreas templadas de México. 2ª edición. Distribuciones Fontamara, S. A.
- Astier, C.M.; M. Maass-Moreno y J. Etchevers-Barra. 2002. Derivación de Indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36:605-620.
- Batles, N.H. 1999. Management Options for Reducing CO₂ concentrations in the Atmosphere by Increasing Carbon Sequestration in the Soil. Report 410-200-031, Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change & Technical Paper 30, International Soil Reference and Information Center, Wageningen.
- Beare, M.H.; Cameron, K.C.; Williams, P.H. y C. Doscher. 1997. Soil Quality Monitoring for Sustainable Agriculture. NZPPs paper-Soil Quality Monitoring for Sustainable Agriculture. <http://www.hortnet.co.nz> (version noviembre 1999).
- Bezdicek, D.F.; R.L. Papendick y R. Lal. 1996. Introduction: Importance of Soil Quality to Health and Sustainable Land Management. p. 1-8. In: Doran, J.W. y Jones, A.J. (Eds). *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication Number. 49. Soil Science. Society of America, Inc. Madison, WI, USA.
- Bohn, H. L., B. L. Mcneal., y G. A. O'connor. 1993. *Química del suelo*. Limusa. México. 370 p.
- Bouma, J. 2006. Future of soil science. p. 22-24. In: *The future of soils science*. Alfred E. Hartemink. (Ed). IUSS International Union of Soil Sciences. The Netherlands.
- Blum, W.E.H. 2006. The future of soil science. p. 16-18. In: *The future of soils science*. Alfred E. Hartemink. (Ed). IUSS International Union of Soil Sciences. The Netherlands.
- Branfield, R. 1923. The nature of the acidity of the colloidal clay of acid soils. *Journal of the American Chemical Society* 45(11):2669-2678.
- Cajuste, J. L. 1977. *Química de suelos con un enfoque agrícola.*, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Camps-Arbestain, M., M. E. Barreal., C. Mourenza., E. Alvarez., P. Kidd., F. Macias. 2003. Rhizosphere chemistry in acid soils. That differ in their degree of Al-Saturation of organic matter. *Soil Science* 168 : 267-279
- Castro-García, A. y D.A. Córdoba. 1994. Estratigrafía del área volcánica de Tulancingo, Hidalgo, México. *Pancromo* 23, *Revista de Investigación*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo p.26-39.

- Carter, M.R.; E.G. Gregorich; D.W. Anderson; J.W. Doran; H.H. Janzen y F.J. Pierce. 1997. Concepts of Soil Quality and their Significance. In: Gregorich, E.G and Carter, M.R. (Eds) Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science 25. Elsevier Sc.
- Cepeda, D. J. M. 1991. Química de suelos. Trillas 2ª edición. Editorial. México. 167 p.
- Coleman, N.T.,1952. A thermodynamic approach to the study of ion exchange. Soil Science. 74(2):15-25.
- Crapper McLachlan, D.R.1986. Aluminum in Alzheimer´s disease. Neurobiol. Aging 7:525-532.
- Cruz, M. A.; M.A. Valera P.; C. I. Hidalgo M y m.G. 2003. Tenorio A. Calidad del Suelo y su Sustentabilidad. XX Curso Diplomado Internacional de Edafología "Nicolas Aguilera".
- Diario Oficial del Estado de Hidalgo. 2001. Ordenamiento Ecológico Territorial. Estado de Hidalgo. Periódico Oficial No. 14. Gobierno del Estado de Hidalgo. Poder Ejecutivo. 473 p.
- Doran, J.E. y T. B. Parkin. 1994. Defining and Assessing Soil Quality. p. 3-21. In: Doran, J.W; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F. y B.A. Stewart (Eds). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. SSSA Special. Publication Number. 35. Soil Science Society of America, Inc, Madison, WI. USA.
- Doran, J.W. y T.B. Parkin. 1996. Quantitative Indicators of Soil Quality: A Minimum Data Set. p. 25-37. In: Doran, J.W. y A. J. Jones (eds). Methods for Assessing Soil Quality. SSSA Special Publication No. 49, Madison, WI.
- Dumanski, J. 1997. Criteria and Indicator for Land Quality and Sustainable Land Management.
- Effects of acidification, liming, and potential reacidification. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 32 no2/3 73-295.
- Emerson, W. W., R. C. Foster and J. M. Oades. 1986. Órgano mineral complexes in realltion to soil aggregation and structure. In P. M. Huang and M. Schnitzer (eds.) Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. Special publication 17. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin.
- Espen Lydersen., Stefan Löfgren., and Rolf Tore Arnesen. 2002. Metals in scandinavian surface waters:
- Espinosa, J. 1995 Acidez y encalado de los suelos. Informaciones agronómicas (INPOFOS) 0:6-14.

- Fassbender, H. W y E. Bornemisza. 1987. Química de los suelos, con énfasis en suelos de América Latina. San José. Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Fassbender, H. W. 1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José. Costa Rica. 398 p.
- Ferxa Riba Xavier. 2001. Poliaminas y tolerancia al aluminio en variedades tolerantes y sensibles de Zea mays.
- Fitzpatrick, E.A. 1978. Introducción a la ciencia del suelo. Primera edición en español. Publicaciones Cultural, S.A. México.
- Forman, J. 1951. Soil, Health, and the dental profession. Journal of Prosthetic Dentistry. 1:508-522.
- Foy, C.D., Chaney, R.L., White, M.C.1978. The physiology of metal toxicity in plants. Annual Rev. Plant Physiol. 29:511-566.
- Friedman D.; M. Hubbs; A. Tugel; C. Seybold y M. Sucik. 2001. Guidelines for soil quality assessment in concervation planning. B. Joubert. NRCS SQI (Eds). Washintong D.C.
- Galicia Escobar José Humberto. 1981. Efecto del encalado y respuesta al fósforo en suelos ácidos de Izabal con plantas indicadoras de tomate (*Lycopersicum esculentum*). Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Gensemer, R. W., and R. C. Playle. 1999. The bioavailability and toxicity of Aluminium in aquatic environments. Critical reviews in Environmental Science and Technology 29(4) : 315-450
- Gil Vázquez Isaías y Miranda Velásquez Ignacio. 2000. Producción de tomate rojo en hidroponía bajo invernadero. Manual de manejo., Serie de publicaciones de
- Guenkov, Guenko. 1966. Fundamentos de la horticultura cubana. Ediciones de Ciencia y Tecnología Instituto del Libro., La Habana, Cuba. p. 123 – 143
- Guerrero-García, A. 1990. El suelo, los abonos y la fertilización de los cultivos. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa.
- Gutiérrez-Castorena, M.C., y García-Rodríguez J.L. 1a edición en español. 1995. Publicación Especial 3.
- Halvorson, J.J.; J.L. Smith y R.I. Papendick. 1997. Issues of Scale for Evaluating Soil Quality. Journal of Soil and Water Conservation 52:26-30.

- H. R. von Uexkull. 1990. El uso eficaz de los fertilizantes en los suelos ácidos de las tierras altas de los trópicos húmedos. Boletín 10 FAO Fertilizantes, Nutrición Vegetal., Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación., Roma.
- Hargrove, W.L. 1986. The solubility of Al- Organic matter and its implication in plants uptake of Al. Soil Sci. 141(3): 179-181.
- Harris, R.F. y D.B. Bezdicek. 1994. Descriptive aspects of soils quality/health. p. 23-36. In: Doran, J.W. Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F. y B.A. Stewart (Eds). Defining Soil Quality for a Sustainable Environment SSSA Special. Publication Number. 35. Soil Science. Society of America, Inc. Madison, WI. USA.
- Huang, A.1984. Molecular aspects of aluminium toxicity in plants. Rev. plants Sci. 1(4):345-373.
- Hernández S G. 2001. Estudios sobre riesgos naturales y geología ambiental en los municipios de Pachuca y Acaxochitlán, Hidalgo. Avances en investigación geológica ambiental y urbana. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (publicación especial), pp. 87-93
- Huang and M. Schnitzer (eds.) Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. Special publication 17. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin 549 – 592
- Huang, P. M. 1986. Aluminium and the fate of nutrients and toxic substances in terrestrial and freshwater environments. In M. Singh (editor in chief) Encyclopedia Of systems and control. Pergamon Press, Oxford.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). 1992. Fertilización en diversos cultivos. 5ª. aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. ICA. Bogotá. 64 p.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. INEGI. 1997. Acaxochitlán, Estado de Hidalgo. Cuaderno Estadístico Municipal. Edición 1996. Aguascalientes, México. 111 p.
- Jackson, M. L., P. M. Huang. 1983. Aluminium of acid soil in the food chain and senility. In R. E. Wilding and E. A. Jenne (eds.) Availability of trace metals. Elsevier, Amsterdam, 269-276
- Jansen, S., M. R. Broadley, E. robbrecht, and E. Smets. 2002. Aluminium hyperaccumulation in angiosperms: A review of its phylogenetic significance. The Botanical Review 68(2) 235 – 269

- Janvier, C.; F. Villeneuve; C. Alabouvette; V. Edel-Hermann; T. Mateille y C. Steinberg. 2007. Soil Health through soil disease suppression: Which strategy from descriptors to indicators? *Soil Biology & Biochemistry*. 39:1-23.
- Jaramillo, J. Daniel F. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Medel.
- Kamprath, E. J. 1970. Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached minerals soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc* 34 : 252-54
- Karlen, D.L.; M.J. Mausbach; J.W. Doran; R.G. Cline; R.F. Harris y G.E. Schuman. 1997. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Science Society American Journal*. 61:4-10
- Lal, R. 1999. Soil Quality and Food Security: the Global perspective. p. 3-16. En: Lal, R. (Ed) *Soil Quality and Soil Erosion*. CRC Press.
- Larson, W.E. y F. J. Pierce. 1994. The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management. p. 37-51. In: Doran, J.W; Coleman, D.C.; Bezdicsek, D.F. y B.A. Stewart (Eds). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. SSSA Special. Publication Number. 35. Soil Science. Society of America, Inc. Madison, WI, USA.
- Lira Quintero María de Lourdes. 2001. Efectividad del abono orgánico y mejorador de suelos fertilizantes en la producción de maíz, zanahoria y caña de azúcar. Chapingo, Texcoco. Edo. de México
- Logan, T.J. 2000. Soils and Environmental Quality. p. G-155-G-169. In: Sumner, M.E. (Ed). *Handbook Soil Science*. CRC Press. ISBN 0-8493-3136-6.
- López-Martínez José Dimas., Díaz Estrada Antonio., Martínez Rubín Enrique., y Valdez Cepeda Ricardo D. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en Maíz. *Terra Volumen 19: 4* 293 – 299 p
- M. Camps Arbestain., M.E. Barreal., C. Mourenza., E. Álvarez., P. Kidd., and F. Macías. 2003. Rhizosphere chemistry in acid forest Soils that differ in their degree of Al-saturation of organic matter. *Soil Science* 168 no4 267-79
- Martin, J. P., K. Haider. 1986. Influence of mineral colloids on turnover rates of soil organic carbon. In P. M.
- Martín, R.B.1988. Bioinorganic chemistry of Al. p.p. 1-57. En: *Metal ions in biological systems*. Vol.24. Aluminium and its role in biology. H. Siegel y Siegel eds. Marcel Dkker Inc. New York.

- Martínez C. R. 1999. Simposio internacional y reunión nacional de lombricultura y abonos orgánicos. Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. Chapingo, México
- Massot, N., Poscherieder, Ch., Guevara, P., Barceló, J. 1991. Aluminio: I Presencia y dinámica en el medio ambiente. *Cir. Far.* 309:49-64.
- Mc Lean, E.O. 1958. Aluminum in soils I. Extraction methods and magnitude in clays and Ohio soils. *Soils Science Society of America Proceedings.* 22(5):382-387.
- Mc Lean, E.O. 1964. Aluminum in soils V. Form of aluminum as a cause of soil acidity and a complication in its measurement. *Soil Science.* 97(2):119-126.
- McKeague, J. A., J. A., M. V. Cheshire, F. Andreux and J. Berthelin. 1986. Organo mineral complexes in relation to pedogenic processes. In P. M. Huang and M.
- Mehra, O. P., and M. L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrato system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7:317 – 327.
- Mohen, A.V. 1988. El desafío de la lluvia acida. *Investigación y Ciencia.* Octubre.
- Molina Flores Carmen y Domínguez García Rosendo. 1992. Respuesta del maíz al encalado en suelos ácidos (alfisoles y andisoles) en el estado de México. Universidad Autónoma Chapingo.
- Molina Rojas, Eloy. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo 1ª edición. – San José, Costa Rica. ACCS.
- Mucke. Mausbach. 1996. Soil Quality Information Sheets. p. 393-399. In: Doran, J.W. y Jones, A.J. (Eds). *Methods for Assessing Soil Quality.* SSSA Special Publication Number 49. Soil Science Society of America, Inc. Madison, WI, USA.
- INIFAP. 1979. División Agrícola Tecnología llave en mano. Tomo I y II. México, D. F.
- Nesbitt, H. W., Young, G.M. (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48, 1523-1534.
- Nesbitt, H. W., Young, G.M. (1989). Formation and diagenesis of weathering profiles. *J. Geology* 97, 129-147.
- Nesbitt, H. W., Wilson, R.E., 1992. Recent chemical weathering of basalts. *American Journal of Science* 292, 740-777.

- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
- NRSC, 2001. Natural Resources Conservation Service. Guidelines for Soil Quality Assessment in Conservation Planning. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Soil Quality Institute.
- Núñez Escobar Roberto. 1985. Efecto de la acidez del suelo sobre la producción de cultivos y su corrección mediante el encalado. Folleto 11503.
- Orozco, F. H. 1999. Biología del nitrógeno. Conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Tomo I. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín. 231 p.
- Ortega, G.F., L.M. Mitre S., J. Roldan Q., J. Aranda G., D.J. Morán Z., S. Alanís A, y A. Nieto S. 1992. Carta Geológica de la República Mexicana. Esc. 1: 2 000 000, con texto explicativo. 5ª Ed. Consejo de Recursos Minerales Instituto de Geología, U.N.A.M., México, D.F.
- Ortíz Martínez Dulce Janette. 2005 .Cinética del fósforo en suelos de carga variable del Estado de Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería.
- Pérez Juana., Hurtado Guillermo., Argueta Quirino., Larín Marcos A. 2005. Guía técnica. Cultivo de tomate. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal (CENTA). San Salvador, El Salvador
- Pokras, L. 1956. On the species in aqueous solutions of salts of polyvalent metals. I. History and scope of discussion . Journal Chemical Education. 33(4):152-161.
- 1956. On the species in aqueous solutions of salts of polyvalent metals. II. Polymerization of aqua-bases. Journal Chemical Education. 33(5):223-231.
- Porta, J.; M. López–Acevedo., y C. Roquero de Laburu. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª edición revisada y ampliada. Ediciones Mundi. Prensa. Madrid. 807 p.
- Poscherieder, Ch., Massot, N. Guevara, P., Barcelo, J. 1992. Aluminio: II. Mecanismos de toxicidad en hombre, animales y plantas. Cir. Far. 313:27-42.
- Ramírez, R., D. Corape y N. C. Ramírez. 1983. Efecto del pH en el medio de enraizamiento del maní (*Arachis hypogaea* L.) sobre el peso seco y acumulación de nutrientes. Agron. Trop. 33(1):191 – 211

- Ren-kou Xu and Guo-liang Ji. 2003. Effect of anions of low molecular weight organic acids on adsorption and desorption of aluminum by and from a kaolinite at different pH. *Soil Science* 168: 1 39-44 p.
- Robert W. Gensemer., Richard C. Playle. 1999. The bioavailability and toxicity of aluminum in aquatic environments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 29 no4 315-450.
- Rojas Garcidueñas Manuel. 1959. Parte II Las plantas y el agua. Capitulo IV El suelo; *Principios de Fisiología Vegetal*. Dirección General de Publicaciones Imprenta Universitaria. México., pp 41-44.
- Schnitzer (eds.) Interactions of soil minerals with natural organics and microbes. Special publication 17. *Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin* 549 – 592
- Schofield, R.K.1939. The electrical changes on clay particles. *Soil and Fertilizers* 2(1)1-5.
- Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. 2005. Estadística agropecuaria SIAP. Anuario Agrícola 2001 - 2005
- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación SAGARPA, 2005.
- Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT 2003. El Medio Ambiente en México 2002 en Resumen.
- SEMARNAP/INEGI.1999. Estadísticas del medio ambiente, México, 1999. Informe de la situación general en material de equilibrio ecológico y protección al ambiente 1997 – 1998. México. Tomo 1
- SEMARNAT. 2005a. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Informe de la Situación Actual del Medio Ambiente. Compendio de Estadísticas Ambientales. México. 368 pág.
- SEMARNAT. 2005b. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Indicadores básicos del desempeño ambiental de México: 2005. PNUD – SEMARNAT.
- Singer, M.J. y S. Swing. 2000. p. G-271-G.298. Soil Quality. En *Hanbook Soil Science*. Malcom E. Summer. CRC Press. (ISBN: 0-8493. 3136-6)
- Smith, B. F. L. 1994. Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. In. M. J.
- Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (SMCS). Chapingo, México. 306 p.

- Soil Survey Laboratory Staff. 1976. Methods Manual. Soil Survey Investigations Report 42, Ver. 3.0. US Department of Agriculture. Washington, DC.
- Soil Survey Staff. 1995. Clave para la taxonomía de suelos, versión 1994. Traducción de: Ortiz-Solorio, C.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy 2nd edition. Natural Resources Conservation Service, US Department of Agriculture. Madison, WI.
- Tan, K.H. 1993. Principles of soil chemistry. New York, Marcel Dekker (2e).
- Thomas, G. W., and W. L. Hargrove. 1984. The chemistry of soil acidity. In F. Adam (ed.). Soil acidity and liming. Agronomy Monograph No. 9 American Society of Agronomy. Crop Science Society of America and Soil Science Society Of America, Madison, Wisconsin.
- Valadez López Artemio. 1989. Producción de hortalizas. Noriega editores., Ediciones Limusa. pág. 197 – 211.
- Varallyay, G. 2006. Ideas on the future of soil science. p. 145-146. In: The future of soils science. Alfred E. Hartemink. (Ed). IUSS international Union of Soil Sciences. The Netherlands.
- Wagatsuma, T. Jugo, K., Ishikawa, F., Nakashima, T., 1995. Aluminium-tolerant protoplast from roots can be collected with positively charged silica microbeads: A method bases on differences in surface negativity. Plant Cell physiol. 36:1493-1502.
- Warkentin, B.P. 1995. The changing concept of soil quality. Journal of Soil an Water Conservation 50:226-228.
- Wedepohl, K. H. (1969-1974). Handbook of Geochemistry, Springer-Verlag, Berlin; Geochim. Cosmochim. Acta 28, pp.1273-1286.
- Wilson, (ed.) Clay mineralogy spectroscopic and chemical determinative methods. Chapman and Hall, London. 333 – 357.
- WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. 2nd. edition. World Soil Resources Reports No. 103. FAO. Rome, Italy.
- Zapata Hernández .R. 2004. Química de la acidez del suelo. Primera Edición. Cali, Colombia. Impresión Cargraphics Impresion Digital.

ANEXOS

	Fed	Ald	Sid	& Fep	Alp	Sip	# Feo	Alo	Sio
MUESTRA	%								
M1 A	65.71	15.34	13.62	42.66	218.02	435.56	16.68	17.79	65.23
M2 A	88.45	22.19	18.68	83.42	391.17	776.18	14.77	23.21	67.17
M3 A	184.07	83.05	21.48	22.42	83.05	83.79	34.7	94.09	69.783
M4 F	169.84	67.11	17.13	35.14	161.01	224.07	25.44	87.72	77.24
M5 F	169.66	99.55	14.47	44.45	183.44	198.91	21.55	80.38	68.79
M6 F	122.21	236	76.43	29.63	155.45	61.35	36.7	206.15	104.63
M7 A	128.92	187.8	35.01	11.76	91.95	24.8	44.28	228.77	121.67
M8 F	108.51	346.123	129.36	39.48	224.97	66.58	52.77	304.41	128.03
M9 F	223.65	145.53	20.95	54.7	253.52	204.37	21.12	78.68	70.45
M10 A	134.43	116.79	39.49	27.71	101.59	77.3	44.05	103.89	82.98
M11 A	113.43	37.61	41.25	31.33	168.61	271.18	23.65	34.18	65.13
M12 A	104.21	60.99	53.21	54.34	265.48	472.12	13.07	19.35	68.26
M13 F	91.14	132.55	68.16	11.63	90.93	43.31	18.17	173.15	124.9
M14 F	152.29	132.74	52.55	17.23	127.91	103.48	28.07	170.55	110.42

Tabla A.1.- Extracción selectiva de óxidos de hierro, aluminio y sílice.

Feo, Alo, y Sio = Hierro, aluminio, y silicio extraídos por oxalato ácido de amonio (Smith, 1994).

*Fed, Ald y Sid = Aluminio, hierro y silicio extraídos por ditionito citrato bicarbonato (Mehra y Jackson, 1960)

& Fep, Alp y Sip = Hierro, aluminio y silicio extraídos por pirofosfato de sodio (Smith, 1994).

Anexo A.1.- Composición Química total, Óxidos totales Perfil 1.(Acevedo. O.A, 2007)

PERFIL 1

ÓXIDOS TOTALES	0-9	9-37	37-50	> 50
SiO₂	50.5	51.66	48.61	46.61
TiO₂	2.14	2.12	2.3	1.86
Al₂O₃	19.49	19.22	21	23.88
Fe₂O₃	10.56	10.56	12.24	10.11
MnO	0.19	0.12	0.22	0.05
MgO	1.19	1.21	1.17	1.33
CaO	1.47	1.61	1.08	1.26
Na₂O	0.83	0.94	0.5	0.21
K₂O	0.85	0.89	0.57	0.24
P₂O₅	0.09	0.09	0.07	0.05
PXC	11.01	9.71	11.45	12.64
TOTAL	98.32	98.21	99.23	98.26

Anexo A.2.- Composición Química total, Óxidos totales Perfil 2. .(Acevedo. O.A, 2007)

PERFIL 2

ÓXIDOS TOTALES	0-12	12-22	22-38	38-69	69-100	> 100
SiO₂	26.76	26.1	31.24	31.23	36.24	37.03
TiO₂	1.3	3	1.84	1.94	2.16	2.15
Al₂O₃	19.94	21.7	29.6	29.91	33.48	33.86
Fe₂O₃	11.69	13	11.36	11.96	12.26	12.59
MnO	0.09	0.16	0.05	0.04	0.05	0.04
MgO	0.45	0.27	0.43	0.38	0.28	0.31
CaO	0.32	0.31	0.12	0.09	0.02	0.02
Na₂O	0.31	0.11	0.1	0.13	0.01	0.03
K₂O	0.27	0.28	0.19	0.21	0.1	0.07
P₂O₅	0.34	0.33	0.24	0.21	0.13	0.17
PXC	36.54	33.55	23.58	22.28	16.17	14.96
TOTAL	98.01	98.81	98.75	98.38	100.89	101.23

Anexo A.3.- Composición Química total, Óxidos totales Perfil 3. .(Acevedo. O.A, 2007)

PERFIL 3

ÓXIDOS TOTALES	0-9	9-22	22-30	30-50	50-66	> 66
SiO₂	36.52	40.73	40	42.4	39.07	43.38
TiO₂	2.09	2.23	2.26	2.38	2.47	2.23
Al₂O₃	21.26	23.68	23.78	25.58	24.13	26.5
Fe₂O₃	12.17	12.29	13.19	13.53	14.86	13.48
MnO	0.46	0.5	0.55	0.42	0.27	0.23
MgO	0.62	0.6	0.55	0.55	0.86	1.07
CaO	1.13	1.01	1.02	0.89	0.97	0.88
Na₂O	0.41	0.47	0.48	0.46	0.4	0.63
K₂O	0.43	0.31	0.34	0.35	0.42	0.6
P₂O₅	0.59	0.51	0.57	0.46	0.31	0.25
PXC	24.96	18.1	18.23	13.93	14.04	10.79
TOTAL	100.6	100.4	101	100.9	97.8	100

Anexo A.1.- Composición Química total, Óxidos totales Perfil 4. .(Acevedo. O.A, 2007)

PERFIL 4

ÓXIDOS TOTALES	0-8	8-17	17-64	64-86	> 86
SiO₂	36.67	39.08	39.73	39.96	39.82
TiO₂	2.53	2.72	2.65	2.42	2.24
Al₂O₃	22.16	26.08	27.97	28.97	29.32
Fe₂O₃	14.17	14.91	15.16	14.48	13.78
MnO	0.58	0.43	0.25	0.16	0.14
MgO	0.69	0.73	0.72	0.73	0.69
CaO	0.68	0.44	0.29	0.23	0.2
Na₂O	0.31	0.2	0.07	0.08	0.05
K₂O	0.28	0.2	0.12	0.1	0.09
P₂O₅	0.22	0.18	0.13	0.11	0.09
PXC	22.08	16.09	13.24	13.58	13.58
TOTAL	100.36	101.06	100.33	100.82	100.2

PERFIL 1

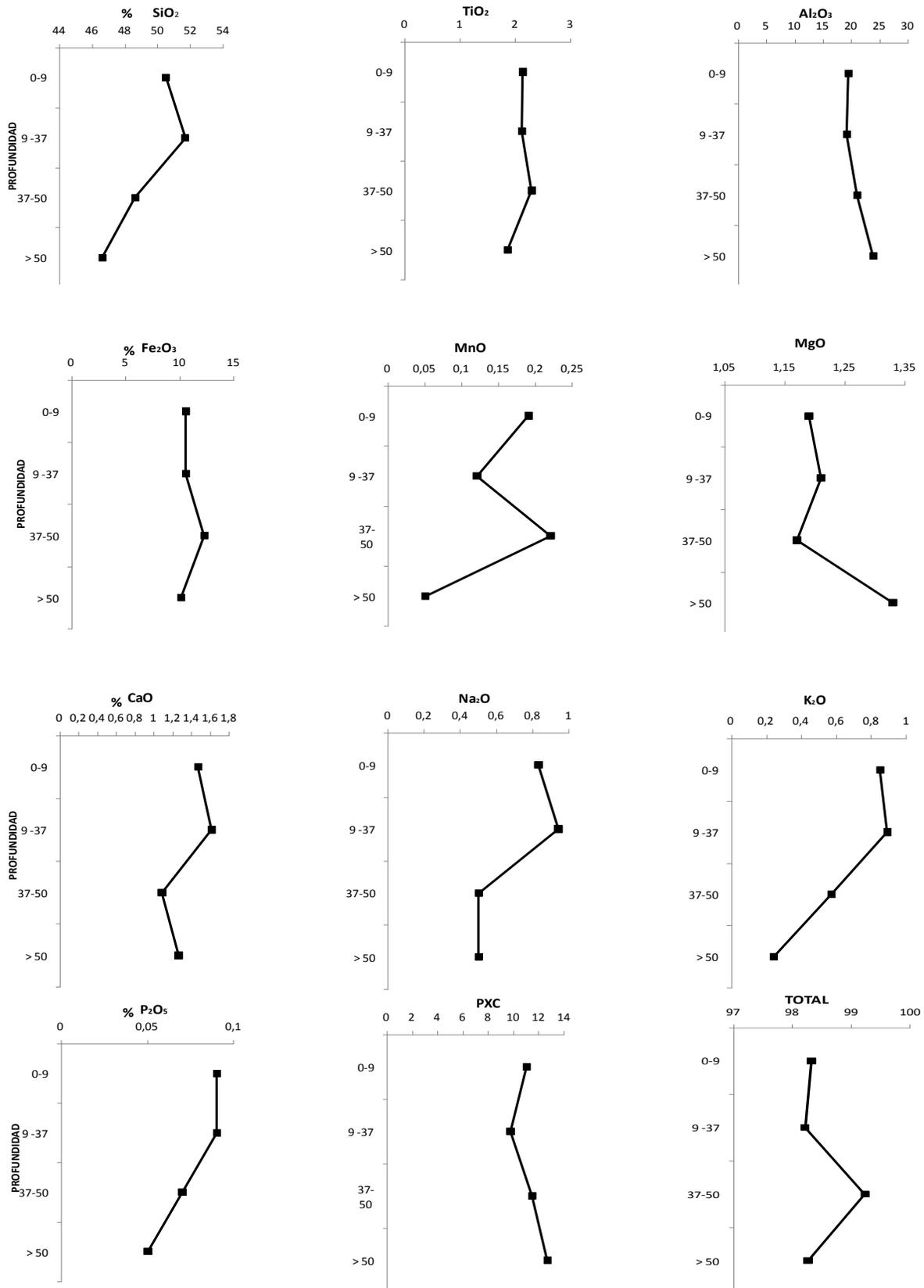


Figura A.1. Distribución de Óxidos de composición química total. Perfil 1

PERFIL 2

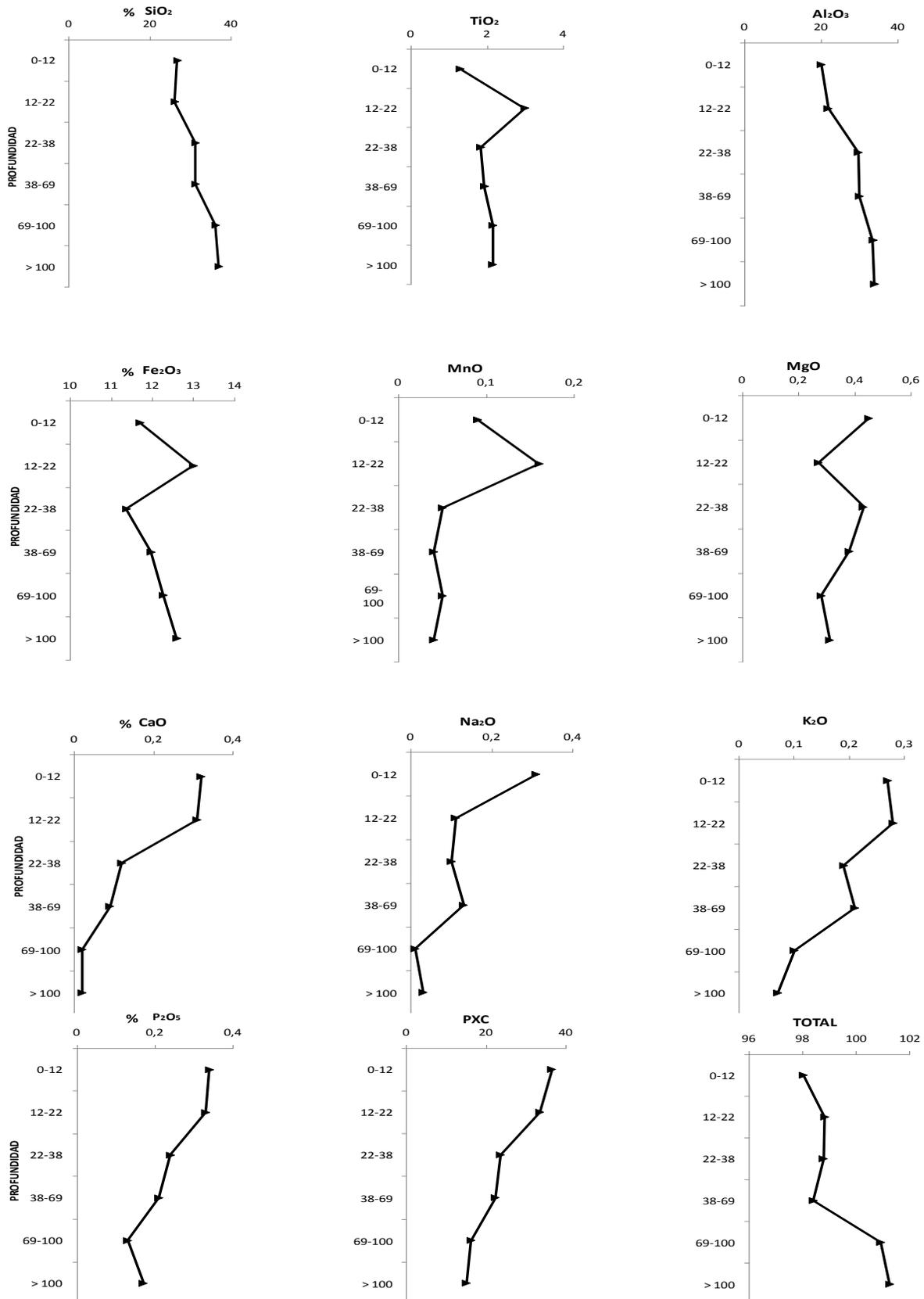


Figura A.2. Distribución de Óxidos de composición química total. Perfil 2

PERFIL 3

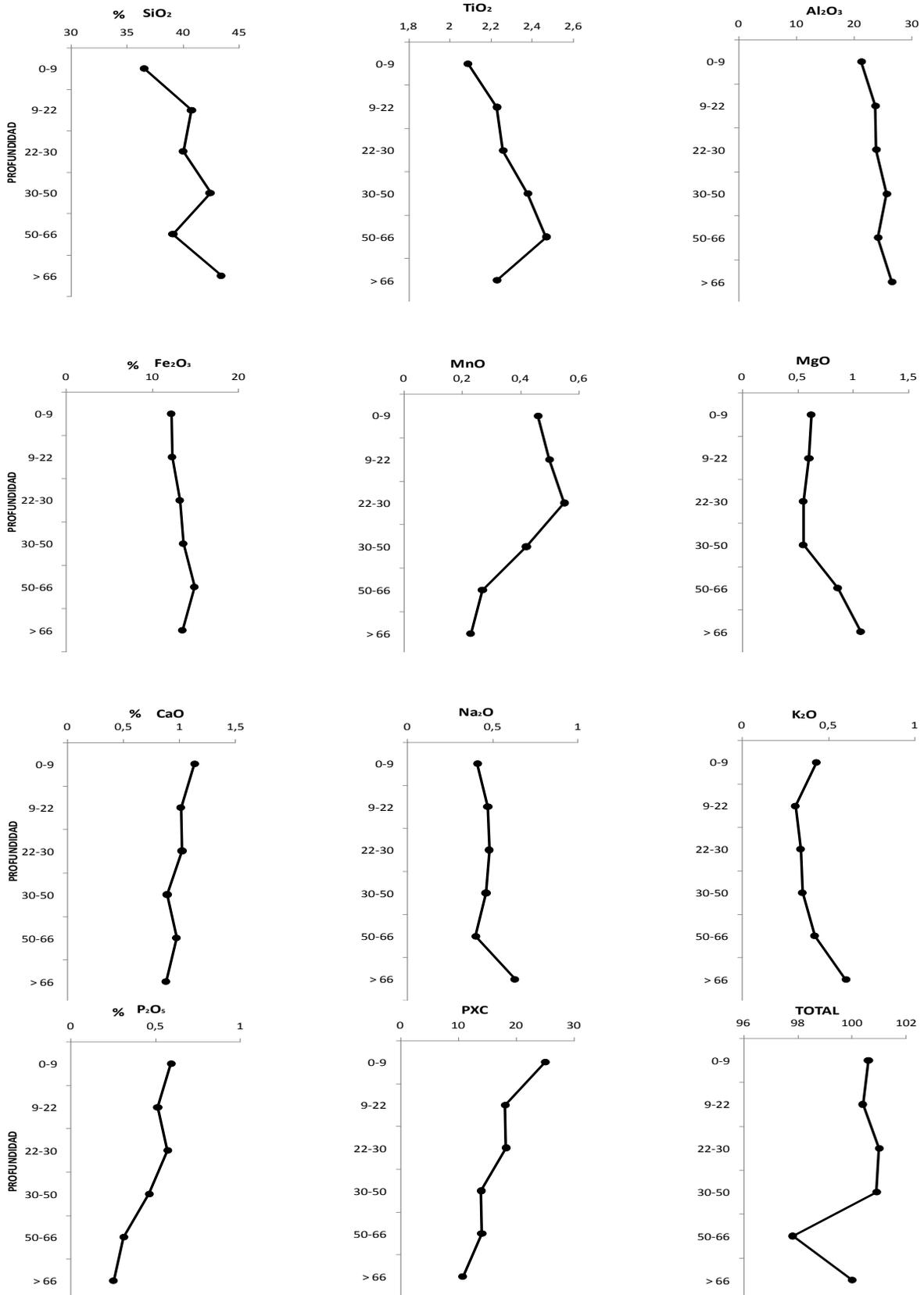


Figura A.3. Distribución de Óxidos de composición química total. Perfil 3

PERFIL 4

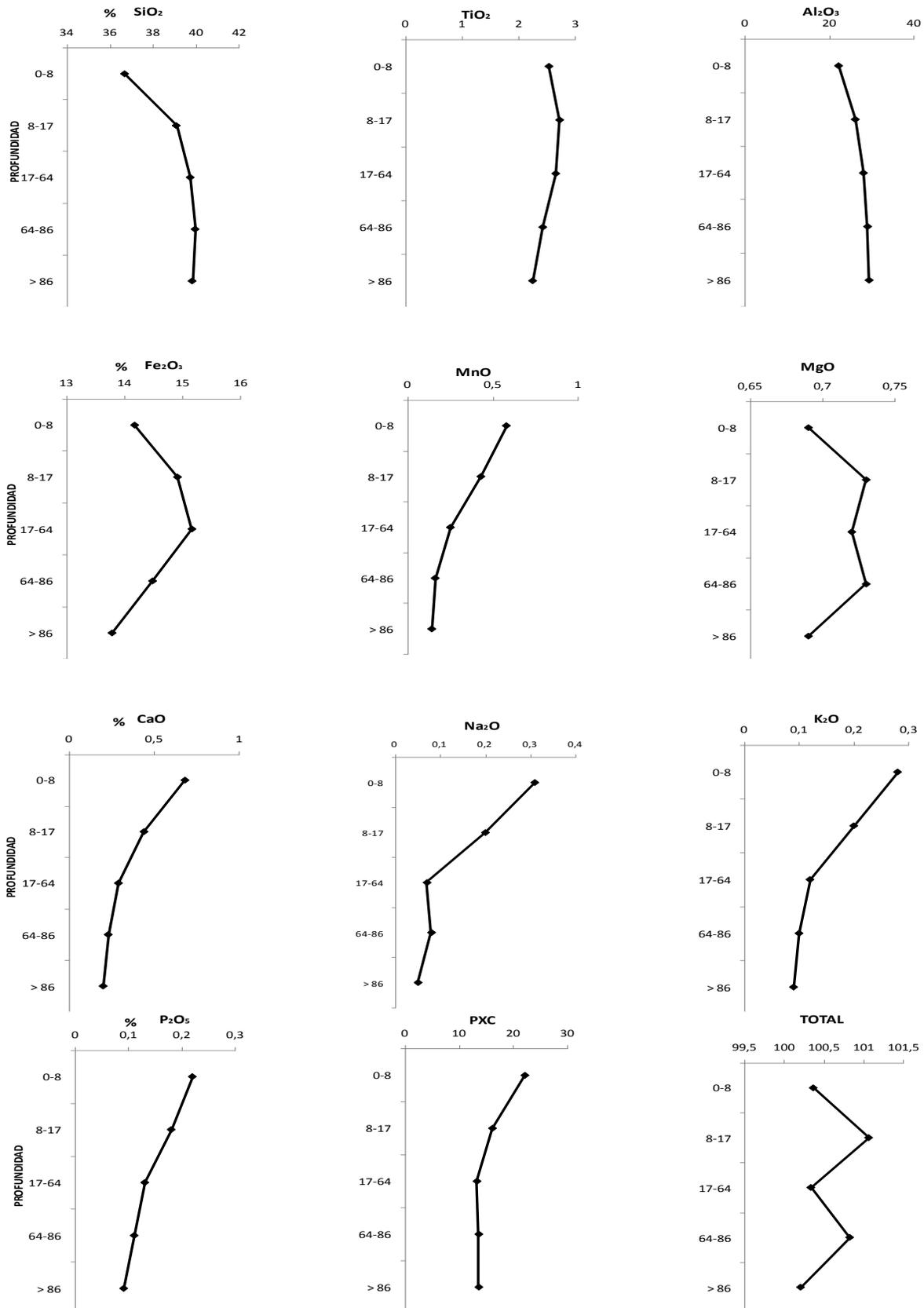


Figura A.4. Distribución de Óxidos de composición química total. Perfil 4