



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**INSTITUTO DE CIENCIAS**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**



*"La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra"*

# IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO PARA EL MUNICIPIO DE XOCHITLÁN DE VICENTE SUÁREZ, PUEBLA

TESIS

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta

**ABEL CRUZ MONTALVO**

Asesor de tesis:

M. C. Miguel Ángel Valera Pérez

Octubre 2014



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**INSTITUTO DE CIENCIAS**

**POSGRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**



*"La tierra no es de nosotros, nosotros somos de la tierra"*

# IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO PARA EL MUNICIPIO DE XOCHITLÁN DE VICENTE SUÁREZ, PUEBLA

TESIS

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

Presenta

**ABEL CRUZ MONTALVO**

Comité tutorial:

Asesor y Tutor	M. C. Miguel Ángel Valera Pérez
Integrante Comité Tutorial	Dra. Claudia Isabel Hidalgo Moreno
Integrante Comité Tutorial	Dra. Gladys Linares Fleites

Octubre 2014



**BUAP**

**C. ABEL CRUZ MONTALVO**

Presente:

Por este conducto me permito comunicarle que los miembros del jurado integrado por:

<i>Dra. América Libertad Rodríguez Herrera</i>	<i>Presidente</i>
<i>Dr. José Víctor Rosendo Tamariz Flores</i>	<i>Secretario</i>
<i>Dr. Fernando Hernández Aldana</i>	<i>1er. Vocal</i>
<i>Dra. Rosalía del Carmen Castelán Vega</i>	<i>2do. Vocal</i>
<i>Dra. María Guadalupe Tenorio Arvide</i>	<i>Suplente</i>

designado para la defensa de su tesis "Identificación de indicadores de la calidad del suelo para el municipio de Xochitlán de Vicente Suárez, Puebla", han manifestado mediante su voto que ésta cumple con los méritos suficientes para ser defendida como tesis de grado de Maestría en Ciencias Ambientales, por lo que este Posgrado le autoriza la impresión de la misma.

Sin otro asunto en lo particular, quedo de usted.

**ATENTAMENTE**

**"PENSAR BIEN, PARA VIVIR MEJOR"**

H. PUEBLA DE Z., OCTUBRE 9 DE 2014

  
**DR. J SANTOS HERNÁNDEZ ZEPEDA**

COORDINADOR



JSHZ/anma  
c.c.p. Archivo  
c.c.p. Minutario

Instituto  
de Ciencias

Edif. 103 E, Ciudad Unversitaria,  
Col. San Manuel, Puebla, Pue.  
C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00 Ext. 7050 y 7051

**Nuestro Dios es grande y el Dinero es su profeta.  
Para sus sacrificios devastamos la naturaleza entera.**

**El Libro del Té**

**A mis hijas Anabel y Mariana,  
por soportarme en el proceso interminable  
de aprender a ser padre**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y mi familia por apoyarme siempre, y a José Jaime esperando que sea el mejor de todos nosotros.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, al Instituto de Ciencias, al posgrado en Ciencias Ambientales y, en especial, a los compañeros del Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas por las experiencias y vivencias compartidas durante todos estos años.

A mis amigos Rosalía, Adriana (las mujeres primero), Víctor, Miguel Ángel, Marco Antonio, César, Eduardo, Rogelio y Gaspar por la solidaridad y ser como son.

Para tí que me adelantaste en el viaje, gracias por todo.

# Contenido

	<b>Página</b>
<b>1. Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos.</b>	<b>3</b>
<b>3. Hipótesis.</b>	<b>3</b>
<b>4. Revisión bibliográfica.</b>	<b>4</b>
<b>4.1 Problemática ambiental del recurso suelo</b>	<b>4</b>
<b>4.2 Concepto e importancia del suelo</b>	<b>8</b>
<b>4.3 Calidad del suelo</b>	<b>9</b>
<b>4.4 Indicadores y sustentabilidad</b>	<b>14</b>
<b>4.5 Indicadores de la calidad del suelo</b>	<b>19</b>
<b>4.6 Enfoque geoestadístico sobre la calidad del suelo</b>	<b>25</b>
<b>4.7 Trabajos sobre calidad del suelo</b>	<b>28</b>
<b>5. Metodología.</b>	<b>34</b>
<b>5.1 Descripción de la zona de estudio</b>	<b>34</b>
<b>5.1.1. Toponimia e Historia</b>	<b>34</b>
<b>5.1.2 Localización</b>	<b>34</b>
<b>5.1.3 Fisiografía</b>	<b>34</b>
<b>5.1.4 Geología</b>	<b>36</b>
<b>5.1.5 Orografía</b>	<b>36</b>
<b>5.1.6 Hidrografía</b>	<b>37</b>
<b>5.1.7 Clima</b>	<b>38</b>

<b>5.1.8 Suelos</b>	<b>38</b>
<b>5.1.9 Flora y Fauna</b>	<b>39</b>
<b>5.1.10 Organización Política</b>	<b>40</b>
<b>5.2 Metodología de campo y laboratorio</b>	<b>40</b>
<b>5.3 Metodología de gabinete</b>	<b>41</b>
<b>6. Resultados y discusión.</b>	<b>42</b>
<b>7. Conclusiones.</b>	<b>64</b>
<b>8. Bibliografía.</b>	<b>65</b>

## Lista de Figuras.

	Página
Fig 1. Superficie relativa afectada por procesos de degradación en México.	7
Fig 2. Grado de erosión en el estado de Puebla (has)	8
Fig 3. Jerarquía de índices agrícolas que muestran a la calidad del suelo como uno de los fundamentos críticos para el manejo sustentable de las tierras	14
Fig 4. Escalas múltiples para la evaluación de la calidad del suelo	23
Fig 5. Localización del Municipio de Xochitlán	35
Fig 6. Xochitlán de Vicente Suárez (antes de Romero Rubio). Carta topográfica 1:250000 INEGI	36
Fig 7. Mapa topográfico del municipio y límites	37
Fig 8. Ubicación de los sitios de muestreo	42
Fig 9. Diagrama de cajas y bigotes para el pH por tipo de suelo	46
Fig 10. Gráfico de efectos principales para pH	47
Fig 11. Diagrama de cajas y bigotes para el %MO por tipo de suelo	48
Fig 12. Gráfico de efectos principales para %MO	48
Fig 13. Diagrama de cajas y bigotes para CE por tipo de suelo	49
Fig 14. Gráfico de efectos principales para CE	50
Fig 15. Diagrama de cajas y bigotes para % arena por tipo de suelo	51
Fig 16. Gráfico de efectos principales para % Arena	51
Fig 17. Diagrama de cajas y bigotes para % limo por tipo de suelo	52
Fig 18. Gráfico de efectos principales para % limo	52
Fig 19. Diagrama de cajas y bigotes para % arcilla por tipo de suelo	53
Fig 20. Gráfico de efectos principales para % arcilla	53
Fig 21. Diagrama de cajas y bigotes para % N por tipo de suelo	54
Fig 22. Gráfico de efectos principales para % N	54
Fig 23. Diagrama de cajas y bigotes para Ca por tipo de suelo	56
Fig 24. Gráfico de efectos principales para Ca	56

Fig 25. Diagrama de cajas y bigotes para Mg por tipo de suelo	57
Fig 26. Gráfico de efectos principales para Mg	57
Fig 27. Resultado General de Calidad de Suelo para el cultivo de café	62
Fig 28. Resultado General de Calidad de Suelo para el cultivo de café por tipo de suelo	63

### **Lista de Tablas.**

Tabla 1. Caracterización de los principales componentes de la función de un suelo con respecto a la producción de cultivos	21
Tabla 2. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para representar la calidad del suelo	23
Tabla 3. Resultados de los análisis fisicoquímicos de las muestras de suelo y ubicaciones de las mismas	43
Tabla 3. Continuación	44
Tabla 4. Estadística descriptiva: pH, %MO, CE, % Arena, % Limo, % Arcilla, %N, Ca, Mg por tipo de suelo	45
Tabla 5. Análisis de varianza para pH	46
Tabla 6. Análisis de varianza para %MO	47
Tabla 7. Análisis de varianza para CE	49
Tabla 8. Análisis de varianza para % Arena	50
Tabla 9. Análisis de varianza para % Limo	50
Tabla 10. Análisis de varianza para % Arcilla	50
Tabla 11. Análisis de varianza para % N	54
Tabla 12. Análisis de varianza para Ca	55
Tabla 13. Análisis de varianza para Mg	55
Tabla 14. Estadística descriptiva para Calidad del Suelo en café	61

## **1. Introducción.**

Los suelos constituyen la interfase entre los diferentes ecosistemas que existen en nuestro planeta. En la actualidad el hombre ha adquirido un mayor conocimiento de las relaciones que existen entre los diferentes ecosistemas y, a la vez, del papel que los suelos desempeñan en estas relaciones. Esto ha cambiado el enfoque de la sociedad con respecto a los suelos. De una evaluación principalmente agronómica de los suelos se ha pasado a una aproximación más integral, la cual considera las implicaciones ambientales de los suelos así como su impacto en la productividad económica.

Sin embargo, el enfoque más integral para manejar los suelos que actualmente se intenta no ha evitado ni disminuido la intensidad de los procesos degradativos que el ser humano provoca en los suelos. La creencia en la posesión de los recursos naturales como bienes que pertenecen a la humanidad y de los que tiene todo el derecho de utilizar en forma irracional ha conducido a las puertas de un desastre ecológico sin precedentes en la historia del ser humano en este planeta.

Los suelos no se han salvado de esta percepción. Esto ha provocado que en las décadas de los años 80 y 90 se generara una percepción más profunda del papel de los suelos en el mantenimiento de las funciones que hacen posible la vida en este planeta y, de esta percepción, ha surgido el concepto de calidad del suelo.

Aun cuando este concepto no es totalmente cómodo para la realización de trabajos científicos, ya que implica el establecimiento de uno o más juicios de valor, debe considerarse la necesidad de este concepto como una herramienta para evaluar los efectos del manejo actual de los suelos y de las tierras en la sustentabilidad de los recursos suelo, agua y aire. De ahí la necesidad de implementar una serie de pasos metodológicos que ayuden a

implementar la evaluación de la calidad de los suelos. Y, dentro de estos pasos, es imprescindible la formulación de conjuntos de indicadores que ayuden a determinar el estado de los suelos. Doran et al. (2001) indican que es necesario incrementar nuestra comprensión de la relación entre las propiedades de los suelos, los procesos que se realizan en este medio y las funciones de los ecosistemas; únicamente de esta manera se logra la mejora de las metodologías para sostener y aumentar la productividad, la biodiversidad y, finalmente, la protección del medio ambiente.

En el caso del municipio de Xochitlán, este trabajo formó parte de un proyecto interinstitucional que intentó plantear una alternativa de manejo sostenible de los recursos suelo y agua del municipio, ya que el municipio fue considerado por la SEMARNAP como prioridad AA, por los desastres causados por las lluvias en 1999, se consideró importante la evaluación del estado de la calidad de sus suelos.

## **2. Objetivos.**

1. Identificar un conjunto de indicadores de calidad del suelo para su uso a una escala regional.
2. Evaluar cómo estos indicadores varían con los tipos de suelo del municipio.

## **3. Hipótesis.**

Existe un conjunto mínimo de indicadores para determinar la calidad del suelo del municipio de Xochitlán de Vicente Suárez.

Existe una variación en los indicadores, y por lo tanto en la calidad del suelo, de acuerdo al tipo de suelos que existen en el municipio.

## **4. Revisión bibliográfica.**

### **4.1 Problemática ambiental del recurso suelo.**

Las dos causas principales de la degradación ambiental en el mundo son la pobreza persistente de la mayoría de la población del planeta y el consumo excesivo por parte de la minoría (PNUMA, 2000). En el caso de América Latina y el Caribe, la pobreza y la desigualdad de ingresos se encuentran entre las presiones socioeconómicas más graves que afectan al ambiente. Para ésta región sobresalen tres problemas ambientales: el primero relacionado con la calidad del medio urbano; el segundo, con la destrucción y agotamiento de los recursos forestales; el tercero, el posible impacto regional del proceso global del cambio climático. La región alberga el 23% de los bosques y el 31% de los recursos de agua dulce del planeta, pero también tiene los peores índices de deforestación del mundo (UNEP, 2012). A la vez en la región existen las mayores reservas de tierra cultivable en el mundo, pero la degradación de los suelos representa una amenaza para buena parte de la tierra cultivada y genera importantes pérdidas de productividad. En grado extremo, ocurre la desertificación del suelo; debido a este proceso se estima que existen pérdidas de alrededor de mil millones de dólares anuales en la región.

Las tasas de deforestación son altas en Sudamérica y África con pérdidas anuales de 4 millones de hectáreas y 3.4 millones de hectáreas., respectivamente, y son impulsadas tanto por el crecimiento poblacional como el económico, la pobreza, la globalización, la inseguridad de los derechos de las poblaciones y el mal cuidado de los ecosistemas forestales. Aunque en Europa existe una tasa de reforestación positiva y ocurre lo mismo en algunas áreas de Asia y el Pacífico, los aumentos en las plantaciones de monocultivos en Asia representan nuevas amenazas para la biodiversidad, especialmente en China e India. Por otra parte, el área forestal global

dedicada a la conservación de la biodiversidad ha aumentado en cerca de 1.9%. Ya que es probable que la demanda de madera, fibras y tierras dedicadas a la agricultura continúe aumentando, a la vez es poco probable que las tasas de deforestación disminuyan sin una estructura de cambios políticos que incentive la protección de los bosques tropicales y los servicios ambientales que estos ecosistemas proporcionan, y al mismo tiempo incentive la restauración de los suelos degradados y poco fértiles más que impulsar el avance de la frontera agrícola (UNEP, 2012).

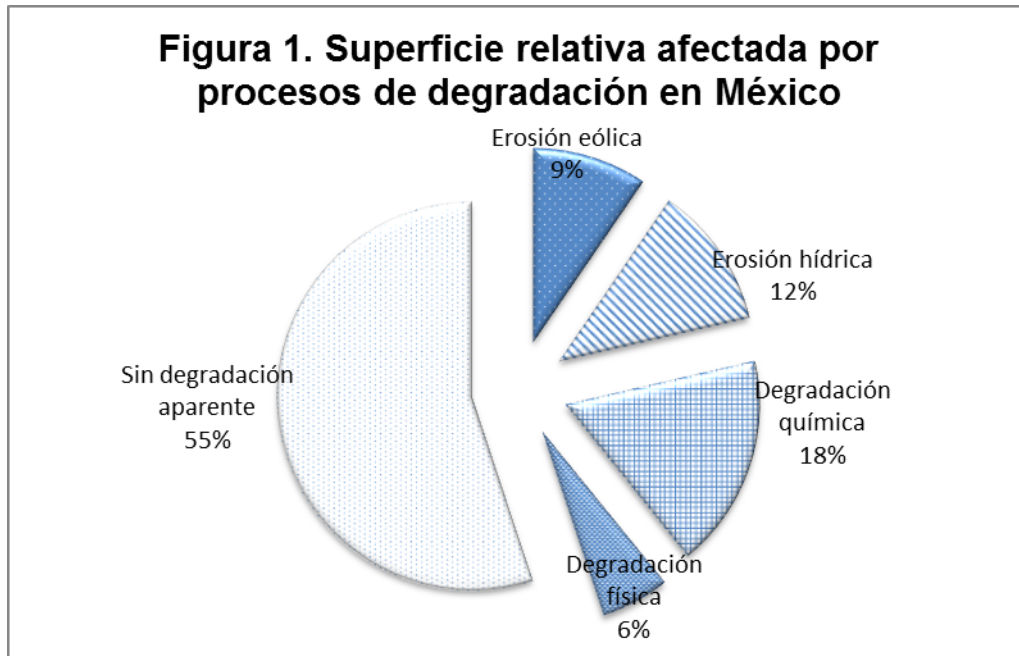
Como consecuencia de las acciones del hombre, el 46% de los suelos de cultivo soportan una degradación moderada; para el 15%, la degradación es muy importante y un 9% se encuentran completamente degradados. El 23% de los suelos europeos se encuentran degradados ya sea química, física o biológicamente (Bouma, 1997). La degradación puede interpretarse como una pérdida significativa de la calidad del suelo. Oldeman (1998) se refiere a la degradación del suelo como los procesos inducidos por las actividades humanas que provocan la disminución de su productividad biológica o de su biodiversidad, así como de la capacidad actual y/o futura de este recurso para sostener la vida humana. Por ejemplo, la degradación química ocurre debido a contenidos excesivos de metales pesados, fertilizantes químicos y biocidas que impiden el crecimiento vegetal.

Lal (1995) describió a los recursos de tierra del mundo (de los cuales el suelo forma parte) como frágiles, finitos y no renovables y señaló que sólo cerca del 22% ( $3.26 \times 10^9$  hectáreas) del área de tierras totales del planeta son potencialmente adecuadas para el cultivo y sólo cerca del 3% (450 millones de hectáreas) tienen una alta capacidad de producción agrícola.

En el mundo, cada año se perdían de 5 a 7 millones de hectáreas de suelo cultivable; se considera que la pérdida ha aumentado a 10 millones de hectáreas anualmente a partir del año 2000. El 16 por ciento de la tierra de

América Latina y el Caribe está afectada por la degradación del suelo. El impacto es mayor en Mesoamérica, donde alcanza el 26 por ciento del área subregional, incluyendo el 74 por ciento de la tierra cultivada, al igual que el 11 por ciento de los pastos permanentes y un 38% de los bosques. Se ha planteado que es necesario rediseñar tres medidas políticas para poner freno a la degradación de suelo: la planificación del uso del suelo en diversas escalas, la sostenibilidad de la producción agrícola y ganadera, y la recuperación de tierras degradadas

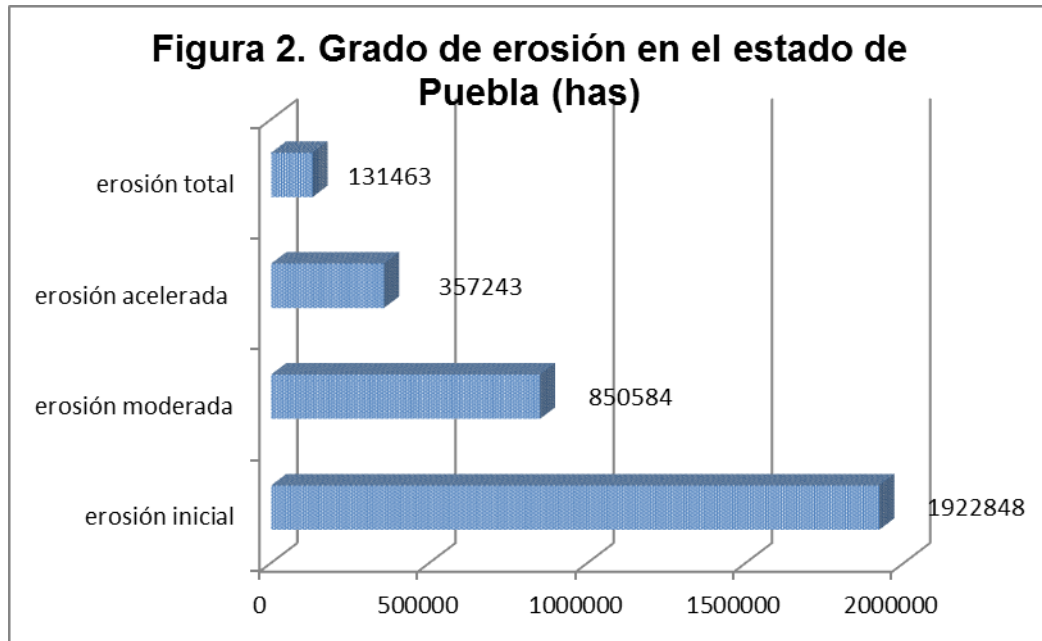
Existen datos divergentes con respecto al país. Un estudio señalaba que en México el 80% de la superficie tenía problemas de degradación de los suelos (Ortiz et al., 1994), esto es aproximadamente 150 millones de hectáreas y la tasa de aumento era de 100 000 a 200 000 ha por año. Un reporte más reciente señala que el 60% del territorio (unas 120 millones de hectáreas) está afectado por un proceso de degradación severo o extremo (SEMARNAP, 2000). Según SEMARNAT (2012), el 44.9% de los suelos del país están afectados por algún proceso de degradación, y se ubican tanto en zonas de ecosistemas naturales como manejados. La degradación química ocupa el primer lugar (34.04 millones de hectáreas) que constituye el 17.8% del territorio nacional), seguida por la erosión hídrica (22.72 millones de hectáreas) lo que representa el 11.9%, la erosión eólica (18.12 millones de hectáreas) un 9.5% y, al final, la degradación física (10.84 millones de hectáreas), un 5.7%. La superficie del territorio sin degradación aparente es de 105.2 millones de hectáreas (un 55.1%) (fig.1). Según el mismo informe las principales causas de degradación en México son el cambio de uso del suelo hacia la agricultura y a las actividades pecuarias (ambas con 17.5%). La deforestación ocupa el tercer lugar con 7.4%, el resto se divide entre urbanización, sobreexplotación de la vegetación y actividades industriales. Todos estos procesos tienen que ver con la reducción de la cubierta vegetal, responsable de la conservación del suelo. En el decenio de 1993 a 2003, la superficie agrícola creció 8.5%, agravando los procesos de degradación.



Fuente: SEMARNAT, 2012

Para el estado de Puebla, de la superficie total se considera que aproximadamente 3 262 138 has (96.2% de la superficie estatal) presentan algún grado de erosión (Fig.2):

- erosión inicial: 1 922 848 has
- erosión moderada: 850 584 has
- erosión acelerada: 357 243 has
- erosión total: 131 463 has



Sin embargo, en el informe de SEMARNAT (2012) se señala que 42% de la superficie nacional podría resultar afectada por erosión hídrica, y que 17 entidades federativas mostrarían daño en más de 50% de su territorio, entre ellas Guerrero con un 79.3%, Puebla con un 76.6%, Morelos (75.2%), Oaxaca (74.6%) y el estado de México (73.7%), como las más importantes.

#### **4.2 Concepto e importancia del suelo.**

El suelo es un recurso natural que requiere de largos periodos de tiempo para su formación y es un componente crítico de la biosfera. Se usa para fines muy diversos: en agricultura, ganadería, pastos y bosques, extracción de minerales y de materiales para la construcción y para su soporte, para eliminación de residuos y para actividades de ocio y recreo. Con respecto a su uso agrícola, los diferentes sistemas utilizados en esta actividad afectan la calidad de este recurso, por lo tanto es necesario evaluar los cambios en la calidad del suelo a diferentes escalas, ya sea regionales o nacionales.

El suelo es esencial para el sostenimiento de la vida de todas las criaturas vivientes; por lo tanto, la capacidad para definir y evaluar la

calidad del suelo es primordial para el desarrollo, funcionamiento y evaluación de los sistemas de manejo sostenible de este recurso.

El suelo es un recurso vivo, dinámico, que soporta la vida vegetal. Tiene propiedades físicas, químicas y biológicas que cambian continuamente. Proporciona una matriz física, un ambiente químico y biológico para el intercambio de agua, aire, nutrientes y de calor que los organismos vivos requieren.

Controla la distribución del agua de riego o la proveniente de la precipitación hacia sus diferentes destinos (agua de escorrentía, agua almacenada, agua subterránea, etc). La regulación del flujo de agua afecta el movimiento de materiales solubles, tales como nitrógeno (en forma de nitratos) o pesticidas.

El suelo regula la actividad biológica y el intercambio molecular entre las fases sólida, líquida y gaseosa. Esto afecta el ciclo de los nutrientes, el crecimiento de las plantas y la descomposición de los materiales orgánicos.

Actúa también como un filtro para proteger la calidad del agua, del aire y de otros recursos. Proporciona soporte mecánico para los organismos vivos y para sus estructuras. La vida silvestre y la del ser humano dependen de esta función.

#### **4.3 Calidad del suelo.**

Los primeros esfuerzos científicos reconocieron la importancia de clasificar el suelo y de considerar, con respecto al uso del mismo, qué variables o propiedades se tenían que valorar, especialmente con propósitos agrícolas. De acuerdo a Jenny (1980), tanto el tipo como las propiedades del suelo usualmente se relacionan y, combinadas, se usan para definir el estado

del sistema suelo. Fue necesario entonces desarrollar clasificaciones tanto para la capacidad de los terrenos como para diferentes propósitos de uso de los suelos. Actualmente, se considera que uno de los retos más importantes que enfrenta la ciencia del suelo es desarrollar criterios de calidad del suelo que se utilicen también en una evaluación objetiva de riesgos ambientales (Sims *et al.*, 1997; Giacometti *et al.*, 2013).

La calidad del suelo se ha definido como la capacidad de un tipo específico de suelo para, dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad vegetal y animal, mantener o aumentar la calidad del aire y del agua, y soportar la habitación y la salud humana (Soil Science Society of America, 1995); definición similar a la de Doran *et al.* (1996), Doran y Parkin (1994) y Doran (2002): la calidad de un suelo es la capacidad del mismo para funcionar, dentro de un ecosistema y los límites de uso de los terrenos, en el sostenimiento de la productividad biológica, en el mantenimiento de la calidad ambiental y en promover la salud de las plantas, de los animales y de los seres humanos. Acton y Gregorich (1995) definen calidad del suelo como la condición de éste para mantener el crecimiento de las plantas sin que ocurra degradación ni daños en el medio ambiente. Karlen *et al.* (1997) definen simplemente la calidad del suelo como la capacidad del suelo para desarrollar una función.

Mediante el concepto de calidad del suelo interesa conocer aspectos como:

- 🌐 Pérdida de material del suelo por erosión
- 🌐 Deposición de sedimentos por el viento o agua
- 🌐 Compactación de las capas cercanas a la superficie
- 🌐 Formación de agregados en la superficie
- 🌐 Reducción de la infiltración
- 🌐 Formación de costras
- 🌐 Pérdida de nutrientes

- 🌐 Transporte de pesticidas
- 🌐 Acumulación de sales
- 🌐 Cambios en el pH
- 🌐 Pérdida de materia orgánica
- 🌐 Reducción en la actividad biológica
- 🌐 Infestación por malezas o patógenos
- 🌐 Humedad excesiva

En años recientes debido a la inquietud con respecto a la degradación del suelo y a la necesidad de un manejo sostenible de los agroecosistemas (Carter *et al.*, 1997; Wang y Gong, 1998), resurgió la preocupación hacia las variables del suelo. Aunado a lo anterior, existe la idea del uso del suelo, la cual ha enfatizado el valor del suelo y de sus propiedades para una función específica. Este enfoque ecológico del suelo reconoce las interacciones suelo-ser humano; de esta forma, la calidad del suelo es inseparable del concepto de sostenibilidad del sistema y se considera un indicador clave de la sostenibilidad del ecosistema. Muscolo et al. (2014) señalan que la calidad del suelo es el resultado de una conservación continua del recurso y de los procesos de degradación que lo afectan y, finalmente, representa la capacidad del suelo para funcionar como un ecosistema vivo saludable. Acton y Gregorich (1995) consideran que la calidad de los suelos determina la sostenibilidad agrícola, la calidad del ambiente y, como consecuencia de lo anterior, la salud de las plantas, de los animales y del ser humano. Lal (1998) indica que existe una relación entre calidad del suelo, progreso económico y calidad del ambiente, considera que el suelo es el más básico de todos los recursos naturales y que además de regular la producción de la biomasa, regula el medio ambiente; por lo tanto existe una estrecha relación entre calidad del suelo y calidad del medio ambiente, por un lado, y en consecuencia entre calidad del suelo y productividad económica.

Asignar un valor al suelo con respecto a un uso o propósito específico conduce (Beare *et al.*, 1997; Carter *et al.*, 1997; Lima *et al.*, 2013) al concepto de calidad del suelo. 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 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 suelo. De las funciones del suelo mencionadas anteriormente, Doran y Parkin (1994) consideran que son tres las que tienen una importancia y significado especial: como medio de producción biológica y vegetal, como filtro para disminuir los efectos de los diferentes contaminantes y patógenos, y como promotor de la salud animal y vegetal e, indirectamente, de la salud humana. Para Calderón *et al.* (2002) las tres funciones principales que desempeñan los suelos son: proveer un medio para el crecimiento de las plantas, regular y distribuir el flujo de agua en el ambiente y servir como amortiguador de los cambios; este concepto toma en cuenta, por un lado, las propiedades intrínsecas del suelo y sus interacciones, y, por otro, las relaciones del suelo con el medio ambiente, las plantas, los animales y los seres humanos. Otro aspecto que incluye es que incorpora el aspecto de producción sostenida en el largo plazo, lo que implícitamente conduce a la búsqueda de estrategias de manejo que formen parte de un modelo de agricultura sustentable.

Warkentin (1995) indica que las funciones del suelo en los ecosistemas son: a) el reciclamiento de los materiales orgánicos para liberar nutrientes y la síntesis posterior de nuevos materiales; b) la distribución de la precipitación; c) 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; d) 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; e) almacenamiento y

liberación gradual de nutrientes y agua; y f) distribución de energía en la superficie, lo cual es importante en procesos de circulación globales.

También, los suelos del mundo desempeñan una importante función en regular las concentraciones de los gases en la atmósfera. Los suelos son el depósito terrestre más importante de 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. Según Dahlgren et al. (2004) los suelos provenientes de cenizas volcánicas contienen una cantidad significativa de carbono, ya que sólo comprenden el 0.84% del área global del planeta pero contienen varias veces más carbono que los suelos no volcánicos. Eswaran et al. (1993) calculan que estos suelos almacenan cerca del 5% del carbono global de los suelos. Se sabe que la capacidad de almacenamiento en estos suelos se desarrolla con el tiempo y que el intemperismo es mucho más lento y menos intenso en suelos no volcánicos comparados con los cambios que ocurren en los Andisoles (Matus *et al.*, 2014). Además del C, los suelos también contienen cerca de 95 Tg de N. Las cantidades atmosféricas de C y N (en la forma de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y NO<sub>x</sub>) se incrementan, mientras que las cantidades de C y N en los suelos disminuyen. La calidad del suelo es importante en la regulación de los flujos gaseosos de los procesos relacionados con el suelo (Bezdicsek *et al.*, 1996).

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. Este autor establece 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 antropogénicos, mientras que la segunda se refiere a la productividad y a la capacidad reguladora del ambiente del suelo.

Karlen *et al.* (2001) establecen que existe una relación conceptual entre calidad del suelo, calidad del medio ambiente y sustentabilidad agrícola (fig. 3).

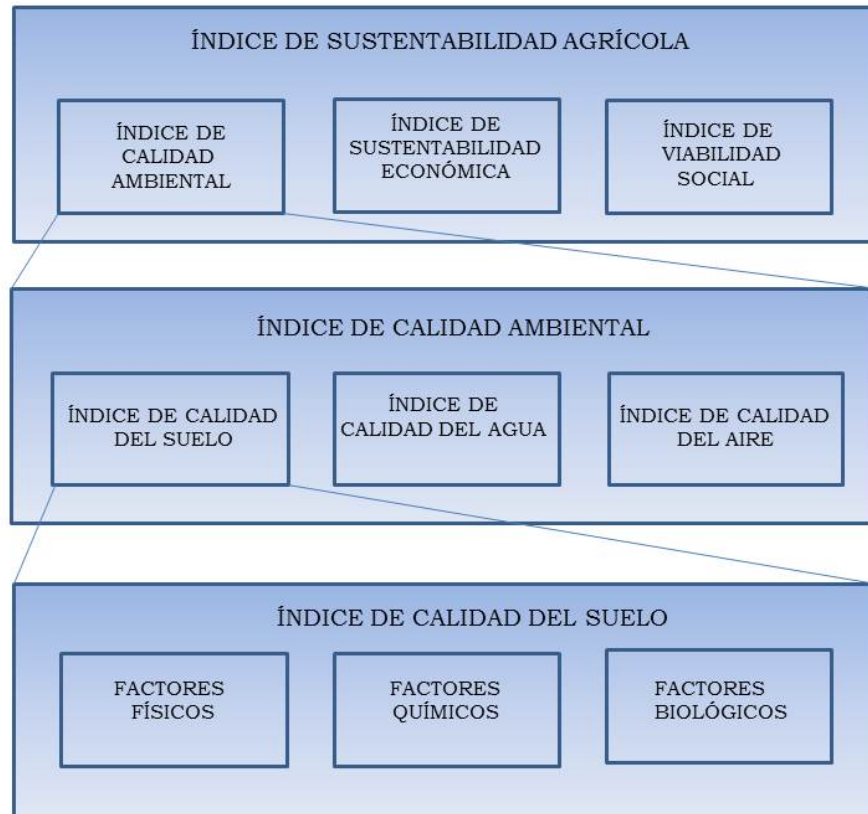


Figura 3. Jerarquía de índices agrícolas que muestran a la calidad del suelo como uno de los fundamentos críticos para el manejo sustentable de las tierras.

#### **4.4 Indicadores y sustentabilidad.**

Dentro del enfoque del desarrollo sostenible y de la agricultura sostenible, uno de los aspectos que ha generado más preocupación es ¿cómo medir los logros hacia la sostenibilidad?, ¿en qué momento podemos decir que los sistemas son más o menos sostenibles? La decisión de las acciones y políticas que deben seguirse para alcanzar la sostenibilidad sólo puede hacerse mediante mediciones o indicadores de sostenibilidad apropiados. En la Agenda 21 (capítulo 40) se establece entre las actividades a desarrollar:

"Los países en el plano nacional y las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales en el plano internacional deberían desarrollar el concepto de indicadores del desarrollo sostenible a fin de establecer esos identificadores" (ONU, 1992).

De acuerdo a esto, Muller (1996) señala que los enfoques actuales para medir la sostenibilidad se pueden clasificar en cuatro grupos: a) los enfoques que tratan de valorar los costos ambientales en el marco de las cuentas nacionales; b) los análisis de impacto ambiental, especialmente a nivel de proyectos; c) la elaboración de modelos económico ecológicos y d) los indicadores, los cuáles son un número o una cualidad que pone de manifiesto el estado o condición de un proceso o fenómeno dados en relación con la sostenibilidad. Menciona también que los indicadores son los que tienen un uso más general. Pueden definirse con diferentes grados de precisión y agregación de acuerdo con el objetivo del análisis y las bases de datos disponibles; ejemplificando, considera al producto nacional bruto como un indicador muy agregado pero éstos también pueden definirse a un nivel de jerarquía inferior, proporcionando así información de una manera más detallada y desagregada. Los indicadores deben ajustarse a las condiciones específicas de un sistema y deben servir como una base para la elaboración de modelos económico-ecológicos y para el análisis de impacto ambiental.

Para Dumanski (1997) son precisamente los indicadores los instrumentos que nos ayudan a monitorear si nos encontramos en el camino hacia los sistemas de uso sustentable de las tierras. Indica que se han realizado muchos intentos para definir conjuntos de indicadores de calidad de los suelos y de las 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.

Syers et al. (1994) señalan que el término indicador se usa en formas bastante diversas, de acuerdo al tema que se trate y a su contexto, pero que en un sentido genérico se puede definir como aquellas variables cuyo propósito sea medir cambios en un fenómeno o proceso dado. Éstos se han usado para evaluar el desempeño (por ejemplo, los indicadores de desempeño usados en educación) o el impacto (los indicadores de impacto de la evaluación ambiental o de asistencia al desarrollo). En el contexto del manejo de las tierras, o más específicamente de la agricultura, los indicadores pueden relacionarse con la sostenibilidad. Conceptualmente, los indicadores pueden considerarse como síntomas de comportamiento de sistemas complejos y pueden utilizarse como herramienta de diagnóstico del estado fundamental de un sistema. A diferencia de indicadores como los de la salud humana o del estado económico que son ampliamente comprendidos, los indicadores ambientales, que reflejan la condición y estado del ecosistema usualmente son definidos con menor rigurosidad y son menos investigados. El reciente interés en el uso de indicadores en el monitoreo ambiental y agrícola es impulsado por la percepción internacional sobre la velocidad y aumento en la degradación del ambiente inducida por el hombre. Los indicadores que se escojan para predecir los efectos de las interacciones antropogénicas con los recursos naturales pueden fracasar en proporcionar información clara y, casi seguramente, fallarán en predecir tendencias y velocidades de cambio en el ambiente a menos que: 1) se basen en investigaciones adecuadas de los mecanismos y procesos de interacción entre los diferentes componentes del sistema y 2) se monitoreen de una forma regular e integral.

Winograd (1995) menciona que en la vida diaria usamos diferentes tipos de indicadores para diferentes propósitos. Sin embargo, requerimos de

indicadores que nos permitan observar y seguir la situación del medio ambiente, el impacto y consecuencias de los procesos de desarrollo sobre los recursos naturales y las funciones ecológicas y las interrelaciones entre los diversos factores del desarrollo, pero, lamentablemente, estos todavía no se encuentran disponibles o en uso. Esto significa un conocimiento inadecuado acerca del proceso de desarrollo ya que el medio ambiente y los recursos naturales constituyen la base misma para el desarrollo y la supervivencia de la humanidad. De aquí que el interés y la necesidad de un desarrollo sostenible y la toma de conciencia frente a las amenazas que pesan sobre el medio ambiente y el mal manejo de los recursos naturales han llevado a que los países, los organismos internacionales y otras instancias, re-examinen los medios de los que se dispone para evaluar y vigilar la evolución y tendencias en el estado del medio ambiente, el uso de los recursos naturales y los procesos de desarrollo.

Es así como los indicadores ambientales y de sustentabilidad actualmente tienen una atención creciente. Aparecen como herramientas indispensables para el seguimiento y la definición de las políticas, acciones y estrategias conducentes a un desarrollo sostenible y al análisis de sus costos y beneficios; además, son importantes para comunicar y hacer accesible información científica y técnica para diferentes grupos de usuarios y pueden desempeñar un papel principal en transformar la información en acción a nivel local, regional, nacional y mundial.

El mismo autor indica que para desarrollar un conjunto de indicadores se requiere, a nivel general y mundial, de una estructura o marco metodológico específico y considera el modelo presión-estado-respuesta (PER) desarrollado por la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico) como el más aceptado a nivel mundial por su simpleza, facilidad de uso y posibilidad de aplicación a diferentes niveles, escalas y actividades humanas. Sin embargo, Muller (1996) menciona que a un nivel jerárquico más bajo

(por ejemplo, finca, cuenca, etc.), no existe tal marco común, sino que los indicadores se definen mediante la sabiduría común o de acuerdo con la experiencia específica de la persona que los seleccionó.

Recientemente, el modelo PER fue empleado en México a fin de establecer indicadores del desarrollo sustentable (INEGI-INE, 2000). Este esquema es tan sólo una herramienta analítica que trata de categorizar o clasificar la información sobre los recursos naturales y ambientales a fin de establecer sus interrelaciones con las actividades sociodemográficas y económicas. Se basa en que las actividades humanas ejercen presión (P) sobre el ambiente, modificando con ello la cantidad y calidad, esto es, el estado (E) de los recursos naturales; la sociedad responde (R) a tales transformaciones con políticas generales y sectoriales, tanto ambientales como socioeconómicas, las cuales afectan y se retroalimentan de las presiones de las actividades humanas.

En el esquema PER se requiere que los indicadores: a) sean de fácil elaboración y comprensión; b) contribuyan a inculcar y reforzar la conciencia pública sobre los aspectos de la sustentabilidad y promuevan la acción a nivel local, regional o nacional; c) sean relevantes para la medición y evaluación del progreso hacia el desarrollo sustentable; d) sean factibles de elaborarse a nivel nacional u otras escalas geográficas, considerando: la capacidad nacional, la disponibilidad de información básica, el tiempo de elaboración y las prioridades nacionales; e) estén fundamentados conceptualmente para facilitar comparaciones objetivas en los niveles nacional e internacional; f) sean susceptibles de adaptarse a desarrollos metodológicos y conceptuales futuros; g) ayuden a identificar aspectos prioritarios o de emergencia, orientando nuevas investigaciones; h) cubran la mayoría de los temas de la Agenda 21 y otros aspectos del desarrollo sustentable.

Así, se han identificado 134 indicadores, de los cuales en México se han generado 113 indicadores de sustentabilidad (39 son de presión, 43 de estado y 31 de respuesta; en la categoría ambiental se generaron 44 indicadores de los 55 propuestos). De particular importancia para el presente trabajo es el hecho de que uno de los indicadores no generados corresponde a un indicador de estado, el uso sustentable de los recursos naturales en áreas montañosas, para el cual no existe suficiente información.

#### **4.5 Indicadores de la calidad del suelo.**

Las medidas propuestas de calidad del suelo emplean el uso de indicadores de la calidad del suelo que reflejan la capacidad del suelo para realizar una función (Mausbach y Seybold, 1998). En cuanto a la evaluación de la calidad del suelo, una estructura útil se basa en la siguiente secuencia: funciones, procesos, atributos o propiedades, indicadores de las propiedades y metodología a emplear. Entonces, la calidad del suelo se evalúa sobre la base de la función propuesta para el suelo.

Las funciones tratan con "lo que el suelo hace"; cada función se caracteriza entonces mediante procesos específicos del suelo. Los atributos de calidad del suelo se definen como propiedades cuantificables del suelo que ejercen influencia en la capacidad del mismo para llevar a cabo una función específica. Generalmente, los atributos describen una propiedad del suelo crítica involucrada con el proceso o los procesos que fundamentan una función; el atributo o propiedad del suelo es más útil cuando refleja o mide el cambio en el proceso. En muchos casos, es difícil medir directamente la propiedad específica, de forma que una medida práctica, indirecta, del atributo sirve como indicador de la función. Los indicadores pueden representar, entonces, un atributo o un conjunto de atributos.

Los indicadores deben ser fáciles de medir y verificar, ser sensibles a las variaciones de manejo del suelo (pero no demasiado sensibles) y su error debido al muestreo debe ser bajo (Carter *et al.*, 1997); otros criterios para la elección del indicador son la metodología disponible, la facilidad para comprobar los datos y la exactitud y rapidez del método utilizado. Un aspecto al que se le no se le ha dado gran importancia en su efecto sobre la calidad del suelo es la variabilidad, tanto espacial como temporal, de los posibles indicadores empleados (Halvorson *et al.*, 1997).

Doran y Parkin (1994; 1996) señalan que los indicadores, para ser de uso práctico, deben ser útiles a través de un rango de condiciones socioeconómicas y ecológicas y, por lo tanto, deben cumplir con:

- ▶ Correlacionar adecuadamente con los procesos del ecosistema
- ▶ Integrar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y los procesos y servir como información básica necesaria para la estimación de las propiedades o funciones del suelo, que son más difíciles de medir directamente
- ▶ Ser relativamente fáciles de usar, bajo condiciones de campo y, por lo tanto, empleados 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.

Frecuentemente se restringen los esfuerzos hacia las disciplinas con las que se encuentra más familiarizado el investigador o el grupo de trabajo. Por ejemplo, los microbiólogos frecuentemente limitan sus estudios hacia las poblaciones microbianas, con poca o ninguna consideración de las características físicas o químicas del suelo que definen los límites de actividad de los microorganismos, plantas y otras formas de vida. En la definición de los indicadores de la calidad del suelo debe, entonces, privar un punto de vista holístico y no reduccionista.

Con respecto a la producción de los cultivos, la función del suelo es nutrir y sostener el crecimiento vegetal. La función del suelo para la producción de cultivos se subdivide en diferentes componentes: actuar como medio para el crecimiento de las plantas; regular y distribuir el flujo de agua, gas y energía; servir como un sistema de filtración o como buffer. En la tabla 1 se muestran las funciones de un suelo relacionadas con el crecimiento vegetal y algunas de sus características.

Tabla 1. Caracterización de los principales componentes de la función de un suelo con respecto a la producción de cultivos

Componente de la función	Características o procesos
Medio de crecimiento vegetal	Medio adecuado para la germinación de semillas y el crecimiento radicular Ausencia de condiciones químicas adversas (acidez, salinidad, sodicidad) Suministro balanceado de nutrientes Medio adecuado para los microorganismos (ciclo de los nutrientes, descomposición) Promoción del crecimiento y desarrollo radicales
Regulación de agua	Recibir, almacenar y liberar agua para el uso por las plantas Retención adecuada del agua para regular y reducir los efectos de la sequía Infiltración adecuada y capacidad de almacenamiento para reducir la escorrentía
Regulación de gases	Aceptar, retener y liberar gases Movimiento adecuado del aire e intercambio con la atmósfera
Regulación de energía Filtro o buffer	Reciclaje de la materia orgánica Aceptar, retener y liberar nutrientes Retener compuestos y/o elementos tóxicos Disminuir la toxicidad de sustancias nocivas para las plantas

Karlen *et al.* (1997) proponen que la evaluación de la calidad del suelo se base en 4 funciones críticas de éste: i) el permitir la entrada de agua, ii) retener y suministrar agua para las plantas, iii) resistir la degradación y iv)

sostener el crecimiento de las plantas. Señalan que la calidad del suelo puede ser vista desde dos formas distintas: primero, como una característica inherente de un suelo y, segundo, como la condición o “salud” de un suelo. La calidad inherente está regulada por los procesos de formación del suelo, de manera que resulta que cada suelo tiene una capacidad para realizar una función. Esta característica inherente se define por un rango de valores de los parámetros que reflejan el potencial de un suelo para realizar una función específica. El segundo método para evaluar la calidad del suelo supone que si un suelo está funcionando a todo su potencial para realizar un uso específico tiene, por lo tanto, una excelente calidad. Mientras que si un suelo está funcionando muy por debajo de su potencial se puede considerar como de pobre calidad. Proponen el siguiente esquema conceptual para evaluar la calidad del suelo (figura 4).

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

La identificación de los atributos claves del suelo, que son sensibles a las funciones que desempeñan, permiten 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 del suelo de importancia para una función específica del mismo (Carter *et al.*, 1997). Tanto el tipo de medición como el procedimiento deben estandarizarse, al menos dentro de una región geográfica. Si existen parámetros de medición que sean demasiado costosos o difíciles de medir, se recurre a otras propiedades utilizando las llamadas funciones "de transferencia del suelo" (pedotranfer). Estas últimas son

funciones matemáticas que relacionan las características y propiedades del suelo entre sí (Larson y Pierce, 1994).

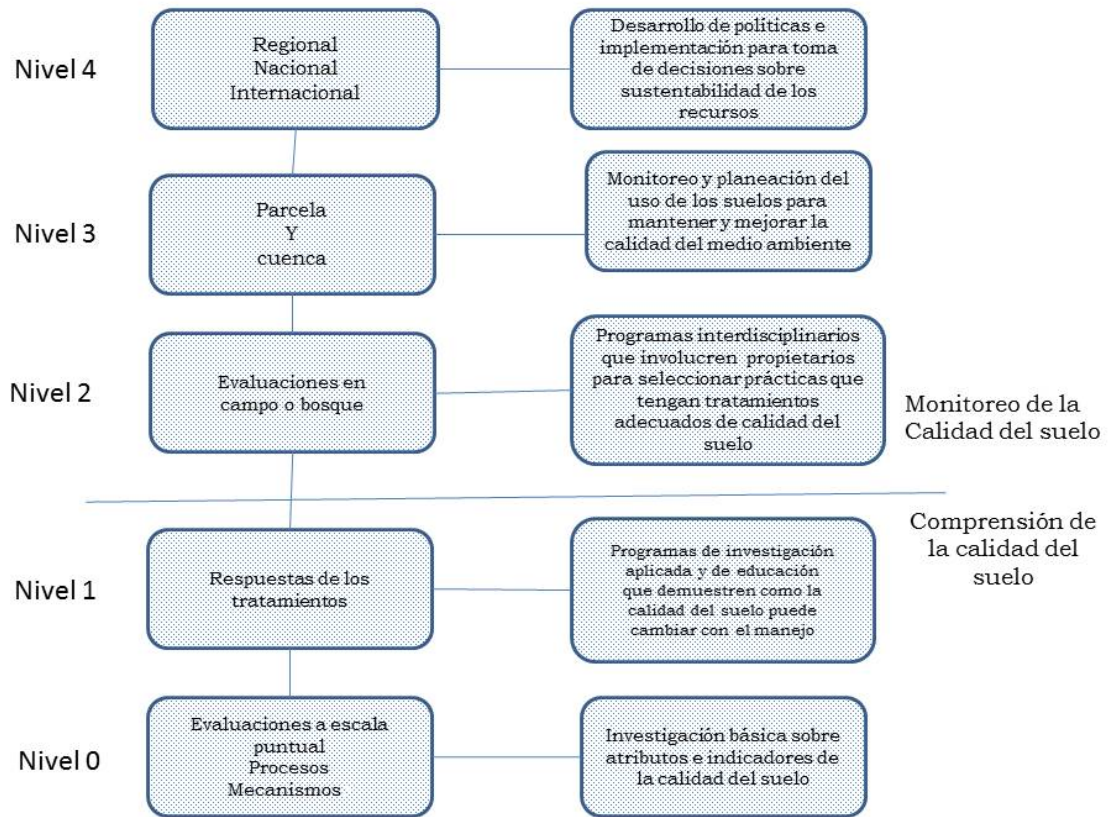


Figura 4. Escalas múltiples para la evaluación de la calidad del suelo

Se han propuesto varios conjuntos de indicadores de la calidad del suelo, en la tabla 2 se presenta un ejemplo de una de estas propuestas (Mausbach y Seybold, 1998).

Tabla 2. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para representar la calidad del suelo.	
Indicadores de la condición del suelo	Relación con la condición y función del suelo
<i>Física</i>	

Textura	Retención y transporte de agua y de compuestos químicos; erosión del suelo y estimación de variabilidad
Profundidad del suelo, espesor del horizonte superficial y profundidad de las raíces	Estimación de la productividad potencial y de la erosión
Infiltración y densidad aparente	Productividad, erodabilidad
Capacidad de retención de agua	Relacionada con la retención y transporte del agua, erodabilidad; disponibilidad de agua
<i>Química</i>	
Materia orgánica	Define la fertilidad del suelo, su estabilidad y la extensión de la erosión
pH	Define los límites de la actividad biológica y de la química; esencial para la modelación de los procesos
Conductividad eléctrica	Define los límites de la actividad microbiológica y vegetal
N, P y K extraíbles	Nutrientes disponibles para la planta y pérdida de N; productividad e indicadores de calidad ambiental
<i>Biológica</i>	
C y N de la biomasa microbiana	Potencial catalítico microbiológico y lugar de depósito de C y N
N potencialmente mineralizable	Productividad y potencial de suministro de N; modelación de procesos
Respiración del suelo, contenido de agua y temperatura	Medida de la actividad microbiológica; estimación de la actividad de la biomasa

#### **4.6 Enfoque geoestadístico sobre la calidad del suelo.**

El enfoque estadístico del muestreo de los suelos ha supuesto, desde hace varias décadas, que cada observación es independiente y se distribuye de forma idéntica, sin embargo, esta suposición de la independencia de las observaciones no siempre se cumple en las ciencias agrícolas. Como es bien sabido las variaciones en las propiedades del suelo tienden a correlacionarse a través del espacio, tanto en sentido vertical como horizontal, esto es, dos valores que se toman cercanos tienden a ser más semejantes que dos muestras que se encuentran más alejadas (Warrick *et al.*, 1986). En estos casos, donde las variables presentan una dependencia espacial, las técnicas estadísticas clásicas usuales ya no son válidas y se han desarrollado métodos estadísticos para la detección y caracterización de esta dependencia (Cressie, 1993; Goovaerts, 1999; Hergert, 1998; Sabbe y Marx, 1987).

Los datos espaciales consisten en mediciones u observaciones hechas en localizaciones determinadas o dentro de regiones específicas. Además para evaluar varios atributos de interés, los sistemas de datos espaciales incluyen las localizaciones o posiciones relativas de los valores de los datos. Las localizaciones pueden ser de puntos o de áreas referenciadas. Los datos de puntos referenciados son observaciones grabadas de localizaciones de arreglos específicos y se referencian por latitud y longitud. Los datos en áreas referenciadas son observaciones específicas de una región.

Las localizaciones espaciales pueden ser regulares e irregulares: la localización de puntos podría caer en una retícula regularmente espaciada, o podría ser irregular con variaciones de distancia entre los puntos; la localización regional puede abarcar bloques contiguos igualmente clasificados que podrían servir en un estudio de campos agrícolas. Los datos espaciales pueden ser continuos o discretos (Kaluzny, 1997).

La geoestadística se define como la aplicación de la teoría de funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales (Journel y Huigbrets, 1978), o bien, el estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio, siendo una herramienta útil en el estudio de estas variables (Zhang *et al.*, 1992). Conceptualmente, la geoestadística ofrece una aproximación alternativa en la que se cuantifican las correlaciones espaciales. La estimación de una propiedad en un sitio no muestreado se determinará principalmente mediante mediciones hechas en sitios cercanos, en vez de basarse en un promedio. La geoestadística proporciona un conjunto de herramientas estadísticas para incorporar las coordenadas espaciales de las observaciones realizadas en el suelo en el procesamiento de datos lo que permite la descripción y modelación de distribuciones espaciales, la predicción de valores en sitios no muestreados y la evaluación de la incertidumbre asociada a estas predicciones (Goovaerts, 1998).

Las aplicaciones de la geoestadística, dimensionalmente, pueden ser para distancias de unas cuantas moléculas o de kilómetros. Los métodos pueden ser usados para analizar cualquier número de propiedades del suelo, ya sea químicas, físicas o biológicas, y pueden incluso extenderse para incluir la respuesta de la planta o los rendimientos de los cultivos. Aun cuando inicialmente las técnicas se desarrollaron para problemas muy prácticos relacionados con la minería, se han extendido enormemente. En el caso de los suelos las aplicaciones más obvias incluyen la interpolación para la preparación de mapas, alcanzar una precisión determinada en un muestreo o incluso la localización de nuevos puntos de muestreo.

Igualmente, es muy importante considerar la variabilidad espacial en las propiedades de un suelo en un área determinada con el fin de evaluar el potencial productivo de la misma (Paz *et al.*, 1996); al mismo tiempo es necesario preservar la fertilidad de los suelos dentro del marco de un modelo

de agricultura sustentable (Schnug *et al.*, 1998) en el cual se garantice la preservación de los recursos naturales y de la calidad del medio ambiente. Así mismo, la geoestadística se usa para estimar y realizar mapas de riesgo de exceder valores límites específicos en la ciencia del suelo (Goovaerts y Journel, 1995; Smith *et al.*, 1993).

Las variaciones espaciales con interdependencia son usualmente descritas con un correlograma o variograma (Goovaerts, 1998; Warrick *et al.*, 1986) El variograma se define como la media aritmética de todos los cuadrados de las diferencias entre pares de valores experimentales separados una distancia  $h$  (Journel y Huigbrets, 1978), o lo que es lo mismo, la varianza de los incrementos de la variable regionalizada en las localizaciones separadas una distancia  $h$ . Así que el variograma es una serie de correlaciones para una variable común donde cada par está separado por una distancia  $h$ . En general los sitios muestreados y las distancias  $h$  son cantidades vector, por lo que el variograma dependerá de la dirección así como de la magnitud de  $h$ . El variograma puede tener valores posibles de -1 a 1, de la misma forma que un coeficiente de correlación ordinario.

La técnica estadística se conoce como indicador de variables múltiples kriging (MVIT), mediante ésta es posible realizar una aproximación para integrar un número ilimitado de indicadores de calidad del suelo en un único indicador o índice; mediante esta técnica se usan los datos transformados del MVIT para estimar valores para sitios que no se han muestreado, entonces se transforman los valores de los datos medidos en un índice de calidad del suelo de acuerdo a criterios específicos. Los criterios son valores críticos o rangos de valores que representan la mejor estimación de una buena calidad del suelo; estos criterios y valores críticos se desarrollan y comparan sobre una base regional; es posible utilizar estos datos para obtener la probabilidad de áreas con una buena calidad del suelo.

Mediante el procedimiento de estimación se desarrollan mapas que indican la probabilidad de satisfacer los criterios establecidos, al nivel del paisaje; el método es capaz de definir gradientes de los parámetros del suelo, límites y efectos de interacción a través de la integración de los criterios desarrollados; el método no define la calidad del suelo, únicamente integra los criterios escogidos para representar ésta

#### **4.7 Trabajos sobre calidad del suelo.**

Altieri y Nicholls (2002) proponen una metodología para estimar la calidad del suelo y la salud de un cultivo, utilizando indicadores sencillos de emplear, de forma que el productor y el investigador puedan determinar el estado agroecológico de la plantación. Seleccionaron 10 indicadores de calidad del suelo y 10 de salud del cultivo. Los de calidad del suelo fueron: estructura; compactación e infiltración; profundidad del suelo; estado de residuos; color, olor y materia orgánica; retención de humedad; desarrollo de raíces; cobertura de suelo; erosión y actividad biológica. Con los valores obtenidos para cada indicador construyen diagramas tipo "ameba", que permiten visualizar el estado general de la calidad del suelo y la salud del cultivo. Consideran que la metodología, aunque fue diseñada para café, es aplicable a otros agroecosistemas y además permite estimar la sostenibilidad en forma comparativa o relativa, monitoreando la evolución de un mismo agroecosistema a través del tiempo, o comparando dos o más agroecosistemas con diferente manejo o estados de transición.

Campitelli et al. (2010) realizaron un estudio para determinar los indicadores que mejor representan la calidad de un Haplustol típico del área central de la provincia de Córdoba. Evaluaron seis tratamientos en los que se determinó contenido de carbono orgánico; nitrógeno total; pH; conductividad eléctrica; fósforo extractable; carbono liviano; carbono de ácidos húmicos y carbono de ácidos fúlvicos; densidad aparente; cambio en el diámetro medio

ponderado de agregados; espesor del horizonte superficial y profundidad del  $\text{CaCO}_3$ . Utilizaron análisis de componente principales para evaluar la relación existente entre parámetros de suelo medidos, entre parámetros y tratamientos y entre tratamientos. Sus resultados muestran que los indicadores más sensibles y sencillos de medir para evaluar calidad del suelo están relacionados a la fertilidad de los mismos: materia orgánica (CO y sus fracciones), nitrógeno total, fósforo extractable y la susceptibilidad a la erosión: cambio en el diámetro medio ponderado de agregados, profundidad del carbonato y espesor del horizonte superficial.

García et al. (2008) estudiaron las aplicaciones de las enzimas del suelo como indicadores iniciales de los cambios en la calidad del suelo bajo prácticas de manejo agrícola contrastantes. Compararon 18 huertos de olivo en España con manejo convencional y bajo manejo orgánico. Buscaron observar las variaciones debido a las características de los sitios en el paisaje, del tipo de suelo, del tiempo desde que los sitios empezaron a ser considerados bajo manejo orgánico y de la intensidad de la labranza sobre la calidad del suelo. Encontraron que en los sitios las prácticas de manejo no variaron en su impacto sobre las propiedades físico-químicas básicas del suelo excepto para el N inorgánico disponible y los sitios bajo manejo orgánico presentaron actividades enzimáticas significativamente superiores.

García et al. (2012) señalan que aún no se reconocen todas las funciones que el suelo realiza, por lo que el concepto general de suelo fértil se refiere más bien a sus propiedades químicas, específicamente a la disponibilidad de los macroelementos primarios (nitrógeno, fósforo y potasio) y que recientemente se han propuesto nuevas definiciones que integran las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, así como su capacidad de ser sostenibles, producir alimentos sanos y mitigar la contaminación medioambiental. Sin embargo, indican que aún no existen criterios universales para evaluar cambios en la calidad del suelo, y para ello se utilizan indicadores que son atributos edáficos sensibles al manejo y a las

condiciones edafoclimáticas, entre otras características, que permiten valorar su estado. Indican que entre los indicadores físicos que se han estudiado en los suelos de Cuba se encuentran la permeabilidad, los agregados estables, la estructura y el límite inferior de plasticidad; mientras que entre los indicadores biológicos estudiados se hallan la respiración basal e inducida, la nitrificación real y potencial y la descomposición de la celulosa.

Govaerts et al. (2006) establecieron para trigo y maíz un conjunto mínimo de datos de calidad del suelo para sistemas con labranza a largo plazo, manejo de residuos y rotación del cultivo. Realizaron un experimento a largo plazo con 16 prácticas de manejo de cultivo diferentes variando la rotación, la labranza (convencional y cero) y el manejo de los residuos (eliminación o permanencia del residuo). El conjunto de indicadores que evaluaron fueron parámetros físicos y químicos. Físicos: la estabilidad de los agregados, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración. Químicos: carbono orgánico, nitrógeno, potasio y zinc. Encontraron que la labranza cero combinada con la retención de los residuos mejoró las condiciones químicas y físicas del suelo.

Gray (2013) realizó una estimación de la calidad del suelo en Marlborough, Nueva Zelanda, dada la obligación de reportar específicamente sobre la capacidad de soportar vida del suelo y determinar si las prácticas de manejo actuales satisfarán las necesidades de las generaciones futuras. Los datos de monitoreo del suelo que realizó tienen la función de proporcionar información sobre el efecto que las actividades tienen sobre la calidad del suelo y si es necesario realizar cambios en el manejo del recurso. Para lograr las metas se realizó un programa de monitoreo de la calidad del suelo que involucró el muestreo de una red de sitios que representan los principales tipos de suelo en la región estudiada y los usos de suelo existentes. Se analizaron propiedades químicas, físicas y biológicas consideradas como indicadores robustos de la calidad del suelo. Se muestrearon 118 sitios entre

2007 y 2012 que representaban 4 órdenes de suelo y 6 tipos de uso. Sus resultados mostraron que en 48 sitios los indicadores satisfacían los requerimientos, en 43 había un indicador fuera de rango y en 27 de los sitios eran dos los indicadores que se encontraban fuera del rango deseado.

Halvorson et al. (1996) indican que el desarrollo de un método para evaluar y monitorear la calidad del suelo es crítico para el manejo y formación de políticas sobre este recurso. Señalan que la utilidad del método depende de la posibilidad de integrar muchos tipos diferentes de datos, lograr la evaluación de la calidad del suelo basado en usos alternativos y estimar esa calidad en sitios no muestreados. Utilizaron un método basado en geoestadística no paramétrica, mediante el cual realizaron observaciones en 220 sitios donde determinaron 6 parámetros del suelo. Realizaron una transformación de las variables continuas a variables binarias y construyeron un indicador variable múltiple de calidad del suelo. Luego realizaron mapas de calidad del suelo calculados mediante kriging. Concluyeron que si el criterio para construir el indicador variable múltiple refleja la calidad del suelo entonces el procedimiento kriging puede producir mapas de probabilidad de que un suelo sea de buena o mala calidad.

Laird y Chang (2013) evaluaron el impacto de 19 años de manejo de los residuos sobre la calidad del suelo. Muestrearon el suelo a diferentes profundidades en terrenos con siembra de maíz y de soya y diferente manejo de los residuos de las cosechas. Encontraron que a mayor profundidad los impactos de los diferentes tipos de manejo de los residuos fueron mínimos, con excepción del nitrógeno potencialmente mineralizable. En parcelas con labranza cero los indicadores de calidad del suelo que estudiaron tuvieron menores variaciones que en parcelas con diferentes tipos de labranza. Concluyeron que al aumentar el porcentaje de residuos que se eliminan del suelo después de la cosecha durante un periodo de 19 años los efectos sobre

la degradación de la calidad del suelo son importantes, de forma que el nitrógeno orgánico lábil se agota prácticamente.

Pacheco (2005) realizó una estimación de la calidad del suelo en el municipio de Tepeaca en el estado de Puebla aplicando un estudio geoestadístico mediante un método de Kriging ordinario. Encontró una variación en los parámetros estudiados, de los cuales sólo seleccionó los que presentaron una distribución normal, siendo su conjunto de indicadores el pH, el carbono orgánico, calcio, magnesio y la conductividad eléctrica.

Romaniuk et al., (2011) realizaron un trabajo con el objetivo de evaluar los cambios en las propiedades de los suelos con la aplicación de diferentes cantidades de vermicomposta y realizar un índice de calidad del suelo que permitiera la evaluación de cambios en los parámetros más sensibles del suelo. La aplicación de vermicomposta mostró un efecto positivo en la mayoría de las propiedades químicas y biológicas determinadas a una dosis elevada de vermicomposta. El índice de calidad del suelo mostró un aumento significativo a una dosis de 20 Mg/ha, aun cuando a esta dosis se encontró un incremento significativo en los valores de pH y de conductividad eléctrica, pero también se incrementaron los valores de las propiedades biológicas y bioquímicas estudiadas.

Shukla et al. (2006) identificaron indicadores de calidad del suelo a partir de un análisis factorial de 5 tratamientos utilizando maíz, soya y pasto como cultivos. Agruparon a las propiedades del suelo en cinco factores: transmisión de agua, aireación del suelo, conexión entre los poros del suelo, textura y estado de humedad. De esos factores, el dominante fue el relacionado con la aireación del suelo, siendo el carbono orgánico del suelo el atributo más dominante. Identificaron además la capacidad de campo, la porosidad, el pH y la densidad aparente como otros indicadores importantes para el monitoreo de la calidad de los suelos.

Yao *et al.* (2013) investigó el efecto del cultivo continuo y de diferentes sistemas de rotación sobre potenciales indicadores de la calidad del suelo, con el fin de identificar indicadores de la calidad del suelo efectivos y establecer un conjunto de datos mínimos para los diferentes sistemas de rotación. El estudio lo realizó en suelos salinos en 60 sitios midiendo 22 variables tanto químicas como físicas. Realizó un análisis de componentes principales y determinó 7 parámetros como los más importantes, de estos, mediante análisis de discriminantes seleccionó la salinidad (Cl, Na y conductividad eléctrica), la materia orgánica y la profundidad del manto freático como los parámetros más importantes. Señalan que la materia orgánica y el Cl son los parámetros que ofrecen el potencial más alto para monitorear la calidad del suelo bajo diferentes prácticas de manejo en áreas costeras afectadas por sales.

## **5. Metodología.**

### **5.1 Descripción de la zona de estudio.**

#### **5.1.1. Toponimia e Historia.**

El municipio de Xochitlán, nombre que proviene del náhuatl y significa "lugar florido" (Ayuntamiento de Xochitlán, 1992) o "entre las flores" (Secretaría de Gobernación, 1988), se localiza en la sierra norte del estado. El nombre del municipio estudiado se conjuga con los vocablos Xochitl del náhuatl (flor) y Tlan del totonaco (lugar), y literalmente significa "lugar entre flores".

En Xochitlán se establecieron grupos Totonacos y Nahuas, antes de la llegada de los españoles, además formó parte del señorío de Nauzontla que a su vez pertenecía al reinado de Texcoco, su fundación como poblado se ubica en el siglo XVI y como municipio libre 1885, con el nombre de Xochitlán de Romero Rubio. En 1982 se autorizó al municipio adicionar el nombre del Cadete Vicente Suárez Ortega nacido en esta población, quedando como Xochitlán de Vicente Suárez (Secretaría de Gobernación, 1988).

#### **5.1.2 Localización.**

Se localiza entre los paralelos 19° 54' 00" y 20° 00' 42" de latitud norte y los meridianos 97° 36' 18" y 97° 41' 36" de longitud oeste (Fig.3), a una altura que va de los 500 a los 1900 msnm. Es uno de los 63 municipios que constituyen la Sierra Norte de Puebla (figura 5). Limita al norte con el municipio de Zoquiapan, al sur con el de Xochiapulco, al oriente con el municipio de Nauzontla y al poniente con los municipios de Huitzilán y Zapotitlán de Méndez (Ayuntamiento de Xochitlán, 1992) (Figura 6).

#### **5.1.3 Fisiografía.**

El Municipio se encuentra en la provincia fisiográfica denominada Sierra Madre Oriental, la cual se extiende más o menos paralela a la costa del Golfo de México, desde la frontera norte del país hasta su límite con el Eje

Neovolcánico. Esta provincia consiste fundamentalmente en un conjunto de sierras formadas por estratos plegados constituidos por roca sedimentaria calcárea y arcillosa de edad mesozoica, predominantemente de origen marino.

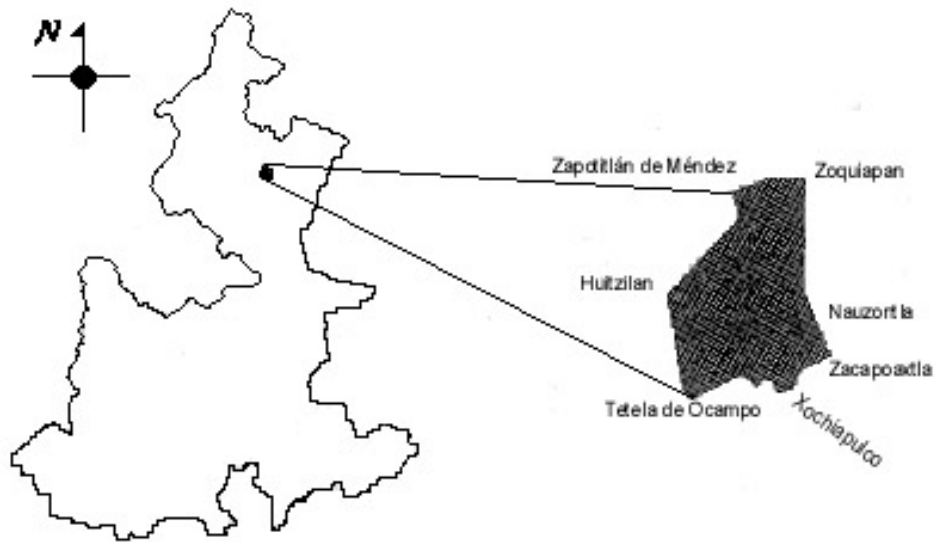


Fig. 5. Localización del Municipio de Xochitlán

La Sierra Madre Oriental está representada dentro de territorio poblano por la subprovincia Carso Huasteco, constituida principalmente por rocas calizas. El área que comprende el Carso Huasteco dentro de territorio poblano pertenece a la región conocida como Sierra Norte de Puebla y ocupa 11.58% de la superficie estatal; abarca 33 municipios completos, entre ellos: Jonotla, Cuetzalan del Progreso, Xochitlán de Vicente Suárez. En esta subprovincia se encuentran materiales sedimentarios calcáreos y no calcáreos, que han sido sepultados parcialmente por rocas volcánicas. El sistema de topofomas que domina es el de sierra alta escarpada, que cubre prácticamente toda la zona.

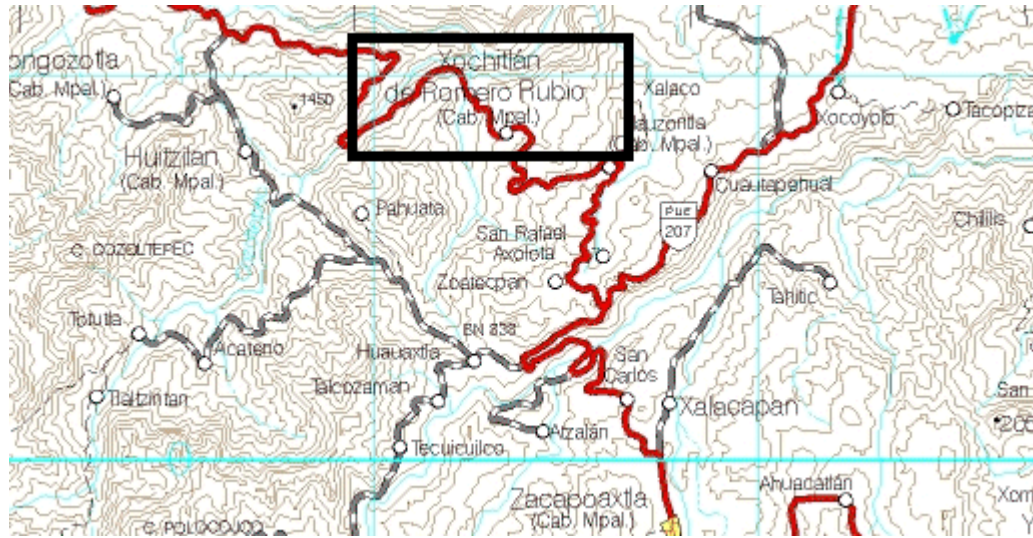


Figura 6. Xochitlán de Vicente Suárez (antes de Romero Rubio)  
Carta topográfica 1:250000 INEGI, 2000

#### 5.1.4 Geología.

La geología del lugar es muy particular, debido a que existen numerosas grutas y afloramientos conocidos por los pobladores como "piedras encimadas" (Ayuntamiento de Xochitlán, 1992). Pertenece a dos regiones morfológicas; las zonas montañosas del norte y sur, forman parte de la Sierra Norte, en tanto que la planicie del centro, pertenece al declive del Golfo. De acuerdo a la carta geológica E14-3, escala 1:250000 editada por el Instituto Nacional de Geografía e Informática en 1984, la geología de la zona de estudio corresponde a asociaciones de lutitas y areniscas del jurásico inferior, rocas sedimentareas calcáreas del cretácico inferior y debido a la actividad volcánica se puede encontrar toba ácida del terciario superior.

#### 5.1.5 Orografía.

El municipio pertenece a dos regiones morfológicas, las zonas montañosas del norte y del sur que forman parte de la sierra norte, y las altiplanicies intermontañas del centro al declive del Golfo de México caracterizado por numerosas chimeneas volcánicas y lomas aisladas.

## Topografía de la región y límites del municipio

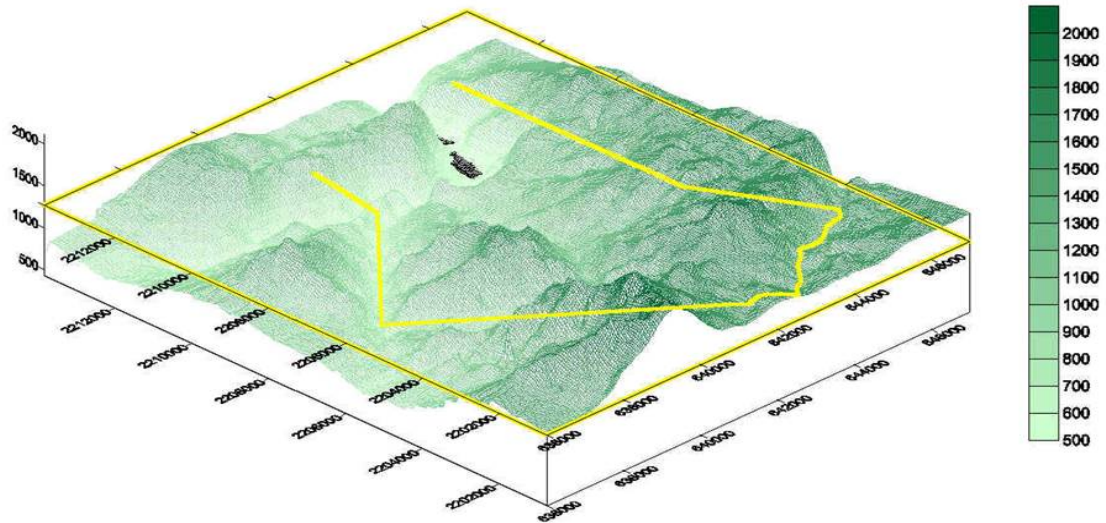


Figura 7. Mapa topográfico del municipio y límites.

El relieve del municipio es muy accidentado; al norte presenta un complejo montañoso irregular que se levanta entre los ríos Apulco, Zempoala y Cuxateno, se caracteriza por sus continuos ascensos y descensos y por sus cerros aislados, entre los que destacan por su altura el Elotépetl, el Mezcaltepetl, Otolotepec y el Ixtaczayo, éste último es el de mayor altura del municipio con 1900 msnm. La zona más baja del municipio (500 msnm) se presenta en una estrecha planicie intermontaña labrada por el río Zempoala. Por último, al sur se levanta una sierra irregular, destacando entre ella el cerro Catzunin que alcanza 1200 msnm.

### 5.1.6 Hidrografía

El municipio pertenece a la vertiente septentrional del estado de Puebla, formada por las distintas cuencas parciales de los ríos que desembocan en el Golfo de México y se caracteriza por sus ríos jóvenes. Se encuentra en la

cuenca del río Tecolutla, de donde parte el río Zempoala, que nace en Chignahuapan, y en el que desembocan los arroyos Apipias, Questepolapan, Tepecapan, Santa Elenea y el Ateno. Es recorrido por los ríos Cuxateno, que recorre la porción oriental de suroeste a noreste, y se une al Zempoala; el río Trapiche de Agua recorre el suroeste de sur a norte y se une al Cuxateno; el Apulco, recorre el sureste del municipio, antes de unirse al Tecolutal, y sirve durante más de 5 km como límite con los municipios de Xochiapulco y Zacapoaxtla; y el Zempoala que baña de oeste a este la porción central para unirse posteriormente al Tecolutla. Existen además algunos arroyos intermitentes que se unen a los ríos mencionados (Secretaría de Gobernación, 1988).

#### **5.1.7 Clima.**

El municipio se ubica en la transición de los climas templados de la Sierra Norte y los cálidos del declive del Golfo. Se identifican dos climas (Secretaría de Gobernación, 1988): en la porción meridional, el C(fm), templado húmedo, con lluvias todo el año, porcentaje de lluvia invernal menor a 18 mm, temperatura media anual entre 12 y 18°C y temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm, este clima se ubica en la porción meridional. El clima predominante, el (A)C(fm), se presenta en la porción central y septentrional, es un clima semicálido subhúmedo con lluvias todo el año, temperatura media anual mayor de 18°C y temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C, precipitación del mes más seco mayor de 40 mm. Los climas anteriores corresponden a la clasificación de Köppen, modificada por García (1989).

#### **5.1.8 Suelos**

La superficie del municipio es de 45.92 km<sup>2</sup>, que representan el 0.14% de la superficie total del estado. Se presentan tres tipos de suelos principales: andosol, litosol y luvisol. Los primeros son suelos derivados de cenizas volcánicas recientes; muy ligeros y de alta capacidad de retención de agua y

nutrientes; por su alta susceptibilidad a la erosión y fuerte fijación de fósforo son adecuados para la explotación forestal; se localizan en amplias áreas del suroeste y centro-este del municipio. Los litosoles son suelos de menos de 10 cm de espesor sobre roca o tepetate; no son aptos para cultivo y se destinan a actividades de pastoreo; se localizan en la ribera del Zempoala y del Apulco, al noreste. Los luvisoles son suelos ricos en nutrientes, con horizonte cálcico o presencia de material calcáreo por lo menos en la superficie; son de fertilidad moderada a alta; se localizan en diversas zonas del municipio.

De acuerdo a la carta edafológica editada en 1984 por el INEGI, a escala 1:250000, el tipo de suelos corresponde a dos asociaciones, a) luvisol ortico con regosol eutrico y rendzina, y clase textural fina (Lo+Re+E/3); b) andosol humico con luvisol ortico de clase textural media y fase lítica pedregosa (Th + Lo/2). Esta clasificación corresponde a la FAO-UNESCO de 1970 modificada por la Dirección General de Geografía.

#### **5.1.9 Flora y Fauna.**

La vegetación que presenta Xochitlán es de bosque tropical subcaducifolio, acompañado de un bosque de pino-encino. En algunas partes se puede encontrar cedro (*Cedrela mexicana*), olivo (*Olea europaea*) y nogal (*Junglas regia*). Pero ha perdido la mayor parte de la vegetación original y conserva las asociaciones boscosas de pino-encino al suroeste y de selva alta y media y bosque mesófilo de montaña al norte; en la parte más baja del municipio se encuentra una vegetación secundaria, en la que se cultiva café, chile serrano y jitomate.

La fauna es rica y abundante, de forma que se encuentran diversos tipos de reptiles: lacértidos como el escorpión y la lagartija, u ofidios venenosos como el mazacuate, variedades de nauyaca, la serpiente coralillo, la cascabel, el tenakate, la huehuetzin y la chirrionera. También se puede encontrar una gran variedad de aves como el ceniztonle, loros, golondrinas, garzas, palomas,

carpinteros, codornices, gavilanes, zopilotes. Entre los mamíferos que se pueden encontrar en el municipio se hallan mapaches, tejones, zorras, armadillo, tlacuaches, zorro gris, ardillas, coyotes, tuzas, conejos) (Ayuntamiento de Xochitlán, 1992).

#### **5.1.10 Organización Política.**

Políticamente se divide en la cabecera municipal: Xochitlán de Vicente Suárez, representada por el Presidente Municipal o Primer Regidor. Una junta auxiliar, localizada en Huahuaxtla, se integra por un Presidente y por regidores de Hacienda, Obras Públicas, Gobernación, Salud, Educación. Forman parte del Municipio diez comunidades o rancherías: Amatitan, Chicuancencuautla, Huapalecan, Ocotepec, Pahuata, San Antonio Tzontecomata, Xalticpac, Xicalxochico, Zocatempan y Techiquil. Las autoridades que rigen estas entidades se conforman por un Juez de Paz, un alguacil y un topil. Hay 2 grupos étnicos principales (nahua y totonaca), aun cuando en la región existen también las etnias tepehua y otomí (Ayuntamiento de Xochitlán, 1992).

#### **5.2 Metodología de campo y laboratorio.**

El trabajo de campo y laboratorio consistió de las siguientes etapas.

✓ Muestreo de suelos (toma de muestras y ubicación geográfica)

Se programó, en primera instancia, un muestreo sistemático de los suelos (Dick *et al*, 1996), con un diseño tipo rejilla (localizando cada punto con ayuda de un GPS), tomando la muestra aleatoriamente dentro de cada rejilla, a una profundidad de muestreo de 0-20 cm.

Sin embargo, por las dificultades topográficas de la zona donde existen pocas zonas planas y la mayoría de la superficie del municipio son lomeríos, con zonas de muy difícil acceso, se decidió realizar un muestreo completamente al azar, tomando las muestras a la misma

profundidad y ubicando cada sitio de muestreo con GPS. En total se tomaron 79 muestras de suelo.

✓ Preparación de las muestras (secado, molienda, tamizado)

✓ Análisis físicos, químicos y biológicos de las muestras:

Los análisis realizados a las muestras fueron: pH, conductividad eléctrica, textura, materia orgánica, nitrógeno total, calcio y magnesio. Todas las determinaciones se realizaron de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-021(SEMARNAT, 2000).

### **5.3 Metodología de gabinete.**

El trabajo de gabinete consistió de:

✓ Recopilación de la información

✓ Análisis estadístico de los datos. Los datos del suelo se analizaron calculando la mediana, los valores mínimo y máximo y los valores de los percentiles 25 y 75. El resumen de los datos se presentan con gráficas “boxplot” o de “cajas y bigotes”. La longitud de cada caja muestra el rango donde se encuentran el 50% de los valores de cada parámetro analizado; el centro de cada cuadrado es el valor de la mediana y los bordes de cada caja representan los percentiles 25 y 75. Los “bigotes” muestran el rango de los valores encontrados, mientras que los valores que no se encuentran dentro del rango se marcan o identifican individualmente. Los indicadores de calidad del suelo para el municipio se establecieron en base a criterios establecidos por los percentiles determinados para cada parámetro de acuerdo a una metodología propuesta por Gray (2013).

## 6. Resultados y discusión.

En la figura 8 se muestra la ubicación de los puntos del muestreo realizado en los suelos del municipio.

Mapa de Suelos del Municipio de  
Xochitlán de Vicente Suárez, Estado de Puebla.

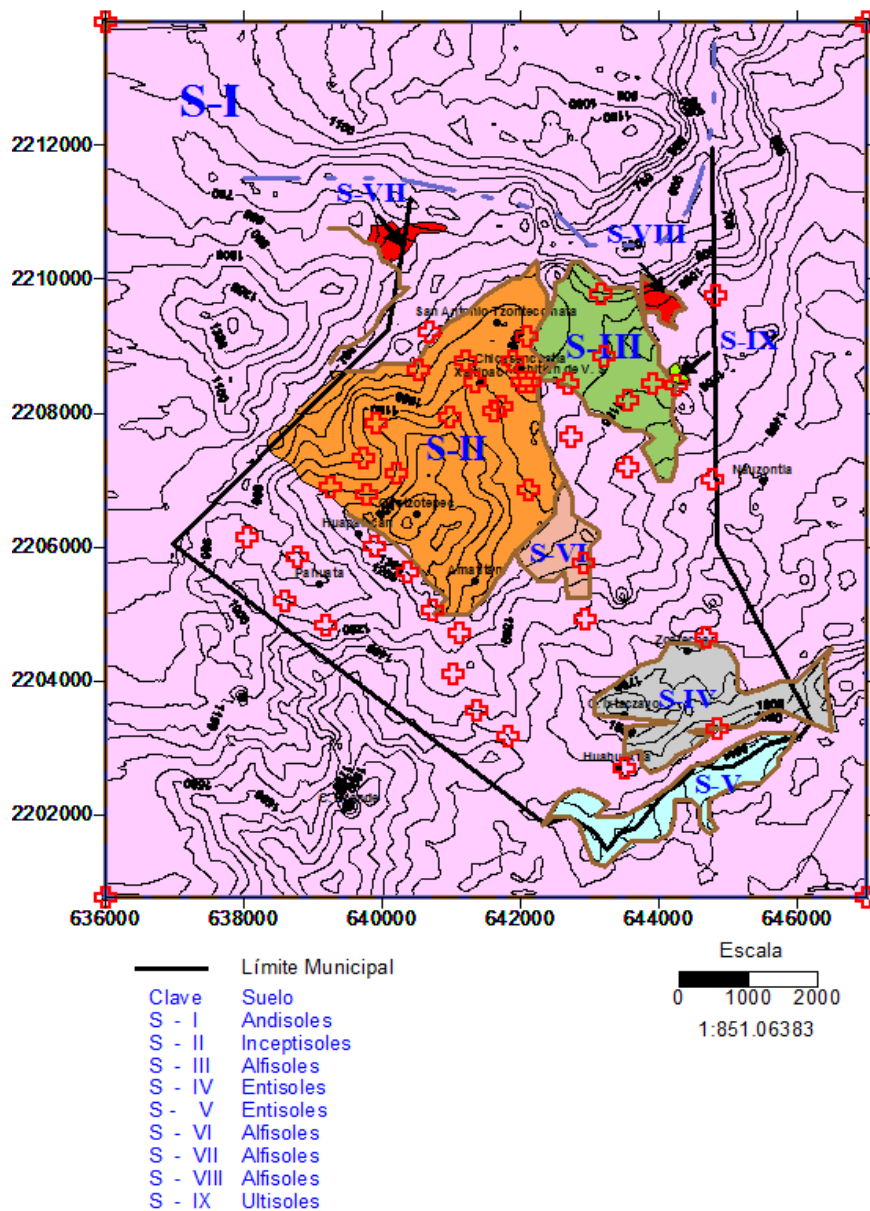


Figura 8. Ubicación de los sitios de muestreo.

Mientras que en la Tabla 3 se presentan los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de suelo que se tomaron en el

estudio. En la segunda y tercera columna se muestran las ubicaciones de los puntos muestreados, mientras que en la cuarta columna se muestra el tipo del suelo de cada muestra de acuerdo a la clasificación que se muestra en la figura 8.

Tabla 3. Resultados de los análisis fisicoquímicos de las muestras de suelo y ubicaciones de las mismas.

Punto	Longitud	Latitud	Suelo	pH	%MO	CE	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clase textural	%N	Ca	Mg
1	643489	2202710	I	7.4	2.3	0.42	30	34.4	35.6	franco arcilloso	0.12	9.2	3.2
2	641815	2203172	I	5.2	4	0.11	44.9	38	17.1	franco	0.16	6.2	2.6
3	644849	2203296	IV	5.4	3.8	0.12	43	32	25	franco	0.19	4.4	2.4
4	641015	2204110	I	5.2	6.1	0.15	48.9	34	17.1	franco	0.28	10.8	2.5
5	640816	2204716	I	6.8	5.4	0.38	24.9	62	13.1	franco limosa	0.27	7.8	2.1
6	640198	2207101	II	7.2	7.4	0.56	28	56.4	15.6	franco limosa	0.33	11.2	2.5
7	640985	2207946	II	6.9	6.4	0.48	26.6	52.2	21.2	franco limosa	0.31	1.5	2
8	641335	2208473	II	4.9	12.8	0.24	34.6	44.2	21.2	franco	0.66	5.2	1.1
9	644690	2204656	I	5.7	14	0.32	22.6	38.4	39	franco arcillosa	0.68	6.4	1.2
10	641372	2203556	I	5.3	8.3	0.28	24.4	36	39.6	franco arcillosa	0.38	7.7	2.9
11	639883	2206103	I	4.8	8.1	0.28	26.8	32	41.2	arcilloso	0.41	7.0	1.5
12	639247	2206903	II	5.9	3.8	0.35	16.9	44.7	38.4	franco arcillo limosa	0.18	5.3	1.6
13	639902	2207845	II	5.9	5.3	0.24	18.9	44.7	36.4	franco arcillo limosa	0.23	7.3	2.6
14	644050	2208021	III	4.9	8.6	0.18	62.9	28.4	8.7	franco arenosa	0.36	6.7	1.9
15	645305	2204270	I	5.3	9.7	0.16	44.9	38.7	16.4	franco	0.42	7.8	2.7
16	645789	2204084	IV	4.4	10.5	0.2	34.8	28.2	37	franco arcillosa	0.46	3.9	1.7
17	644108	2202713	I	7.6	3.2	0.34	29.2	36.4	34.4	franco arcillosa	0.12	7.5	2.3
18	640363	2205638	I	6.5	2.2	0.39	39.6	24.4	36	franco arcillosa	0.11	9.5	1.7
19	639773	2206787	II	7.6	4.6	0.58	32	36.4	31.6	franco arcillosa	0.23	8.6	1.9
20	643551	2207260	I	5.1	5.1	0.15	34	38.9	27.1	franco	0.24	4.2	2
21	640762	2209299	II	5.2	3.4	0.18	28	30.2	41.8	arcilloso	0.14	5.9	1.5
22	640347	2209620	II	5.4	5.1	0.22	34	34.2	31.8	franco arcillosa	0.26	7.3	1.7
23	640623	2208932	II	6.2	6.6	0.34	24	46.2	29.8	franco arcillosa	0.34	7.1	1.5
24	640020	2208590	II	7	1.8	0.36	28	32.2	39.8	franco arcillosa	0.11	8.6	2
25	641640	2209711	II	5.5	3	0.15	22	30.2	47.8	arcilloso	0.18	5.3	2.7
26	641610	2205750	II	4.9	3.8	0.24	40	29.6	30.4	franco arcillosa	0.16	4.5	2.3
27	641070	2205240	II	4.8	9.7	0.29	32	47.6	20.4	franco	0.44	4.8	3.6
28	641980	2206130	II	4.8	9.1	0.26	40	40.9	19.1	franco	0.4	3.6	2.8
29	642010	2206860	II	4.8	5.4	0.2	38	28.8	33.2	franco arcillosa	0.22	3.8	2.7
30	642520	2206320	VI	5.3	5.9	0.36	46	40.9	13.1	franco	0.23	5.2	2.1
31	638040	2206160	I	6.9	4.6	0.44	34	34.2	31.8	franco arcillosa	0.22	6.4	3.4
32	642550	2205180	I	6.1	7	0.44	44	40.2	15.8	franco	0.3	5.8	4.4
33	641260	2204730	I	6.1	8.7	0.48	44	20.8	35.2	franco arcillosa	0.41	5.8	4.2
34	643205	2207577	I	6.5	7	0.54	30	44.8	25.2	franco	0.32	6.2	3.3
35	644588	2209352	I	7	2.7	0.64	30	32.8	37.2	franco arcillosa	0.12	6.2	3.6
36	638592	2205193	I	4.6	9.7	0.32	45.4	34	20.6	franco	0.4	5.4	2.4
37	638772	2205847	I	5.3	4.2	0.28	45.4	30	24.6	franco	0.21	4.8	1.1
38	639176	2204841	I	4.8	5.5	0.22	45.4	26	28.6	franco arcillo arenoso	0.26	5.4	1.4
39	640801	2203712	I	5	11.3	0.18	45.4	36	18.6	franco	0.5	4.6	1.8
40	642080	2209159	II	4.8	9.1	0.24	35.4	36	28.6	franco arcillosa	0.41	5.9	1.4

Tabla 3. Continuación.

Punto	Longitud	Latitud	Suelo	pH	%MO	CE	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clase textura	%N	Ca	Mg
41	643549	2208504	III	7.2	6.4	0.48	22.1	30	47.9	arcilloso	0.3	7.2	3.2
42	642146	2208470	III	6	6	0.38	14.2	36	49.8	arcilloso	0.28	5.7	2.4
43	643190	2208872	III	7.4	6.2	0.46	17.4	28	54.6	arcilloso	0.33	7.9	3
44	640359	2210061	I	7.1	5.1	0.5	17.4	24	58.6	arcilloso	0.2	6.4	1.5
45	643906	2208449	III	5.8	5.2	0.4	21.4	32	46.6	arcilloso	0.24	6.5	2.8
46	641895	2208361	II	5.3	4.4	0.34	23.4	32	44.6	arcilloso	0.18	5.8	2
47	640508	2208665	II	5.3	3.6	0.3	21.4	30	48.6	arcilloso	0.16	4.4	3.1
48	641736	2208104	II	5.6	5.4	0.38	19.4	34	46.6	arcilloso	0.22	4.5	2.2
49	643203	2208863	II	5.8	3.9	0.45	15.4	32	52.6	arcilloso	0.16	5.3	1.7
50	644265	2208419	III	5.7	4.1	0.45	20.7	36	43.3	arcilloso	0.21	5.6	2.2
51	642733	2207651	I	5.6	4.7	0.34	23.4	34	42.6	arcilloso	0.19	4.1	2.8
52	641209	2208785	II	6	6.1	0.38	14.7	34	51.3	arcilloso	0.24	4.9	2.5
53	639754	2208437	II	7	6.2	0.4	18.7	22	59.3	arcilloso	0.27	6.1	1.4
54	642676	2208434	III	5.6	4.7	0.28	12.7	24	63.3	arcilloso	0.21	5.4	1.1
55	640514	2208654	II	6.5	4.4	0.34	14.7	28	57.3	arcilloso	0.16	5.1	2.1
56	639364	2205792	I	5.8	3.2	0.39	47.4	32	20.6	franco	0.15	5.0	1.4
57	639808	2205401	I	5.4	3.9	0.3	45.4	28	26.6	franco	0.14	6.4	1.1
58	641687	2205348	II	5	5.6	0.26	41.4	44	14.6	franco	0.24	3.7	1.7
59	642412	2206826	VI	4.8	4.5	0.22	30.1	36	33.9	franco arcilloso	0.2	4.2	2.5
60	639860	2207417	II	7.2	2.6	0.57	22.1	28	49.9	arcilloso	0.1	5.8	3.2
61	642279	2209593	III	5.9	3.5	0.4	28.1	24	47.9	arcilloso	0.16	5.2	2.2
62	642734	2205590	VI	7.4	2.7	0.48	20.1	28	51.9	arcilloso	0.11	7.4	2.7
63	643191	2208115	III	7.4	2.9	0.56	21.4	22	56.6	arcilloso	0.11	9.5	2.4
64	640640	2208357	II	6.3	2.7	0.5	22.8	28	49.2	arcilloso	0.12	4.8	1.7
65	642412	2208008	I	5.6	3.7	0.35	22.8	34	43.2	arcilloso	0.14	5.8	1.1
66	642923	2207364	I	5.3	3.8	0.27	18.8	36	45.2	arcilloso	0.17	3.5	1.1
67	641365	2209136	II	5.8	3.2	0.32	9.4	28	62.6	arcilloso	0.15	3.8	1.4
68	640668	2205832	II	5.8	4.8	0.36	18.7	28	53.3	arcilloso	0.22	4.2	1.6
69	643828	2204198	IV	6	2.9	0.42	18.7	36	45.3	arcilloso	0.13	3.8	2
70	639619	2208034	II	7.2	1.9	0.54	27.4	30	42.6	arcilloso	0.1	5.7	2.8
71	641042	2206101	II	6	3.4	0.46	9.4	32	58.6	arcilloso	0.14	5.4	2.6
72	643912	2020719	IV	7.5	3	0.68	20.7	20	59.3	arcilloso	0.11	5.4	3.2
73	638894	2206746	I	5.9	3.5	0.56	22.7	20	57.3	arcilloso	0.11	4.8	1.2
74	642385	2208975	II	6.3	2.8	0.41	14.7	30	55.3	arcilloso	0.13	5.7	1.2
75	644288	2208423	III	3.7	9.8	0.34	44.7	28	27.3	franco arcilloso	0.44	3.6	1
76	644686	2209674	III	3.5	15.3	0.4	60.7	28	11.3	franco arenoso	0.68	4.1	1
77	642031	2207806	II	6.8	10.2	0.58	26.7	28.7	44.6	arcilloso	0.44	5.2	2.5
78	640698	2205052	I	5.4	7.6	0.35	52.7	26	21.3	franco arcilloso	0.33	4.9	1.8
79	642927	2204916	I	5.6	5.2	0.29	50.7	32	17.3	franco	0.24	4.7	1.4

Por omisión, no se muestran las unidades de los valores de CE, Ca y Mg, que son dS/m, cmol(+)/kg, respectivamente.

En general, de los resultados obtenidos se observa que el promedio del valor de pH de los suelos del municipio es de aproximadamente 5.9, valor que se considera de acuerdo a la NOM-021 como moderadamente ácido. Esto concuerda con el hecho de que los climas de la zona son húmedos, con

lluvias todo el año, por lo que es lógico que los valores de pH de los suelos tiendan a ser ácidos, al haberse lixiviado los componentes que le dan características básicas a los suelos.

Tabla 4. Estadística descriptiva: pH, %MO, CE, % Arena, % Limo, % Arcilla, %N, Ca, Mg por tipo de suelo.

Variable	Suelo	Número		Media	Desv.est	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo	Rango
		total									
pH	I	29		5.824	0.824	4.600	5.250	5.600	6.500	7.600	3.000
	II	32		5.928	0.849	4.800	5.225	5.850	6.725	7.600	2.800
	III	11		5.736	1.328	3.500	4.900	5.800	7.200	7.400	3.900
	IV	4		5.825	1.297	4.400	4.650	5.700	7.125	7.500	3.100
	VI	3		5.833	1.380	4.800	4.800	5.300	7.400	7.400	2.600
	%MO	I	29		5.855	2.864	2.200	3.750	5.100	7.850	14.000
	II	32		5.266	2.603	1.800	3.400	4.700	6.350	12.800	11.000
	III	11		6.61	3.54	2.90	4.10	6.00	8.60	15.30	12.40
	IV	4		5.05	3.66	2.90	2.93	3.40	8.83	10.50	7.60
	VI	3		4.367	1.604	2.700	2.700	4.500	5.900	5.900	3.200
CE	I	29		0.3403	0.1302	0.1100	0.2750	0.3400	0.4300	0.6400	0.5300
	II	32		0.3600	0.1246	0.1500	0.2450	0.3450	0.4575	0.5800	0.4300
	III	11		0.3936	0.1022	0.1800	0.3400	0.4000	0.4600	0.5600	0.3800
	IV	4		0.355	0.251	0.120	0.140	0.310	0.615	0.680	0.560
	VI	3		0.3533	0.1301	0.2200	0.2200	0.3600	0.4800	0.4800	0.2600
% Arena	I	29		35.69	10.96	17.40	24.65	34.00	45.40	52.70	35.30
	II	32		24.96	8.90	9.40	18.70	23.70	32.00	41.40	32.00
	III	11		29.66	18.02	12.70	17.40	21.40	44.70	62.90	50.20
	IV	4		29.30	11.61	18.70	19.20	27.75	40.95	43.00	24.30
	VI	3		32.07	13.06	20.10	20.10	30.10	46.00	46.00	25.90
% Limo	I	29		33.72	8.00	20.00	29.00	34.00	37.20	62.00	42.00
	II	32		35.10	8.25	22.00	29.00	32.00	43.23	56.40	34.40
	III	11		28.76	4.58	22.00	24.00	28.00	32.00	36.00	14.00
	IV	4		29.05	6.82	20.00	22.05	30.10	35.00	36.00	16.00
	VI	3		34.97	6.51	28.00	28.00	36.00	40.90	40.90	12.90
% Arcilla	I	29		30.58	12.26	13.10	19.60	28.60	39.30	58.60	45.50
	II	32		39.94	13.83	14.60	29.95	42.20	50.95	62.60	48.00
	III	11		41.57	18.01	8.70	27.30	47.90	54.60	63.30	54.60
	IV	4		41.65	14.42	25.00	28.00	41.15	55.80	59.30	34.30
	VI	3		33.0	19.4	13.1	13.1	33.9	51.9	51.9	38.8
%N	I	29		0.2621	0.1370	0.1100	0.1450	0.2400	0.3550	0.6800	0.5700
	II	32		0.2384	0.1249	0.1000	0.1525	0.2200	0.3000	0.6600	0.5600
	III	11		0.3018	0.1563	0.1100	0.2100	0.2800	0.3600	0.6800	0.5700
	IV	4		0.2225	0.1619	0.1100	0.1150	0.1600	0.3925	0.4600	0.3500
	VI	3		0.1800	0.0624	0.1100	0.1100	0.2000	0.2300	0.2300	0.1200
Ca	I	29		6.217	1.693	3.500	4.850	6.200	7.250	10.800	7.300
	II	32		5.509	1.769	1.500	4.500	5.300	5.900	11.200	9.700
	III	11		6.127	1.688	3.600	5.200	5.700	7.200	9.500	5.900
	IV	4		4.375	0.732	3.800	3.825	4.150	5.150	5.400	1.600
	VI	3		5.600	1.637	4.200	4.200	5.200	7.400	7.400	3.200
Mg	I	29		2.197	0.968	1.100	1.400	2.000	2.850	4.400	3.300
	II	32		2.113	0.632	1.100	1.600	2.000	2.600	3.600	2.500
	III	11		2.109	0.785	1.000	1.100	2.200	2.800	3.200	2.200
	IV	4		2.325	0.650	1.700	1.775	2.200	3.000	3.200	1.500
	VI	3		2.433	0.306	2.100	2.100	2.500	2.700	2.700	0.600

Ahora bien, en la tabla 4 se muestran los valores de la estadística descriptiva calculada para cada uno de los parámetros analizados, mostrándose para cada parámetro y por tipo de suelo los valores de la media, la mediana, la desviación estándar, los valores máximo y mínimo, el rango y los valores del primer y tercer cuartil para las gráficas de “cajas y bigotes” de esos parámetros.

Para el caso del pH los valores mínimos caen en suelos fuertemente ácidos y los máximos son suelos neutros o medianamente alcalinos. El análisis de varianza para determinar si existen diferencias estadísticas significativas para los valores de pH demuestra que no es así (tabla 5). Por lo que el pH no es un factor que se diferencie entre los suelos del municipio, por lo que no es adecuado como indicador de la calidad del suelo en este lugar. En las figuras 9 y 10 se aprecia que no existe una diferencia estadística significativa para este parámetro, aun cuando en la figura 10 se nota una pequeña diferencia de pH para los suelos II (inceptisoles) y III (alfisoles), pero esta no es significativa.

Tabla 5. Análisis de varianza para pH.

Factor	Type	Niveles	Valores			
Suelo	fixed	5	I, II, III, IV, VI			
Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Suelo	4	0.3585	0.3585	0.0896	0.10	0.983
Error	74	67.8774	67.8774	0.9173		
Total	78	68.2359				

Figura 9. Diagrama de cajas y bigotes para el pH por tipo de suelo

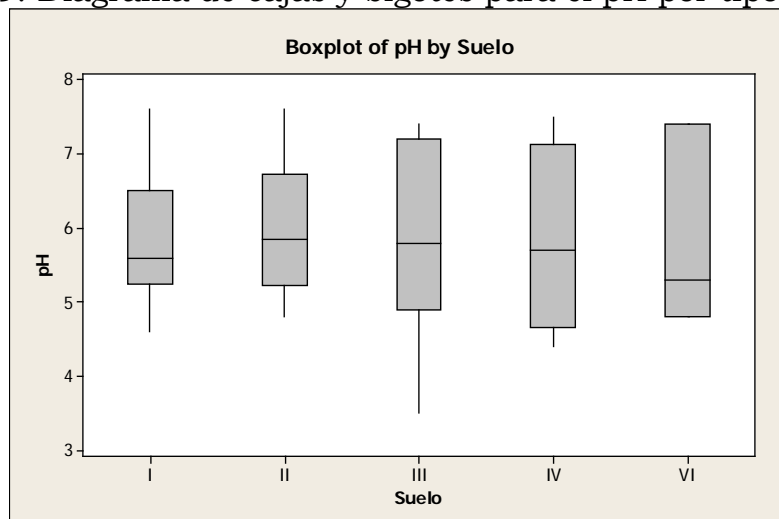
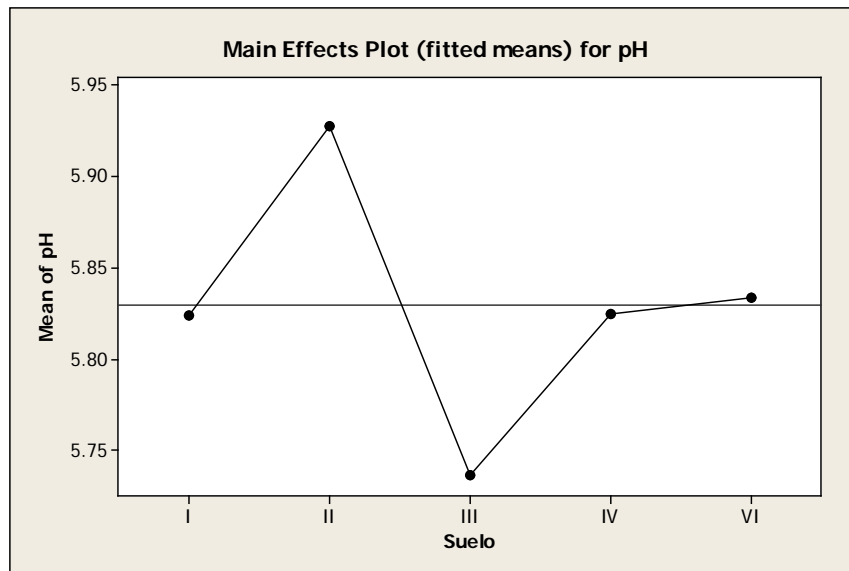


Figura 10. Gráfico de efectos principales para pH



En el caso de la materia orgánica la media para los suelos es de 5.6, que corresponde a suelos extremadamente ricos en materia orgánica; el rango de los valores va desde suelos medios hasta extremadamente ricos. En la tabla 6 se muestra el análisis de varianza para este parámetro, aunque el valor de p no muestra significancia tampoco para este parámetro, sí se observa que existe una mayor variabilidad en este parámetro que en el caso del pH. Lo que se muestra en las figuras 11 y 12. En la gráfica de cajas y bigotes (figura 11) se observan incluso valores que salen fuera del rango o atípicos para los tipos de suelo I y II (andisoles e inceptisoles), y en la gráfica 12 se observa la mayor variabilidad del parámetro por tipo de suelo pero sin llegar a observarse una diferencia estadística significativa. Por lo que tampoco, por tipo de suelo puede considerarse al contenido de materia orgánica como un posible indicador de la calidad del suelo.

Tabla 6. Análisis de varianza para %MO

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Suelo	4	22.395	22.395	5.599	0.68	0.609
Error	74	610.630	610.630	8.252		
Total	78	633.024				

Sin embargo, la elevada proporción de materia orgánica en los suelos del municipio ayuda en un conjunto de propiedades físicas, químicas y

biológicas que, dadas las características topográficas de la región son muy útiles en la conservación y preservación, tanto de los suelos, como de la biodiversidad de la zona, de manera que un manejo adecuado de este contenido es muy recomendable para prácticas agrícolas y forestales futuras en el municipio.

Figura 11. Diagrama de cajas y bigotes para el %MO por tipo de suelo

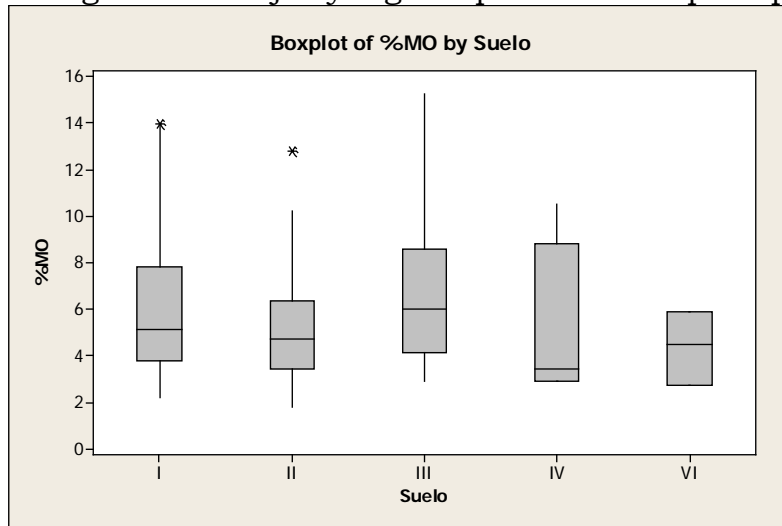
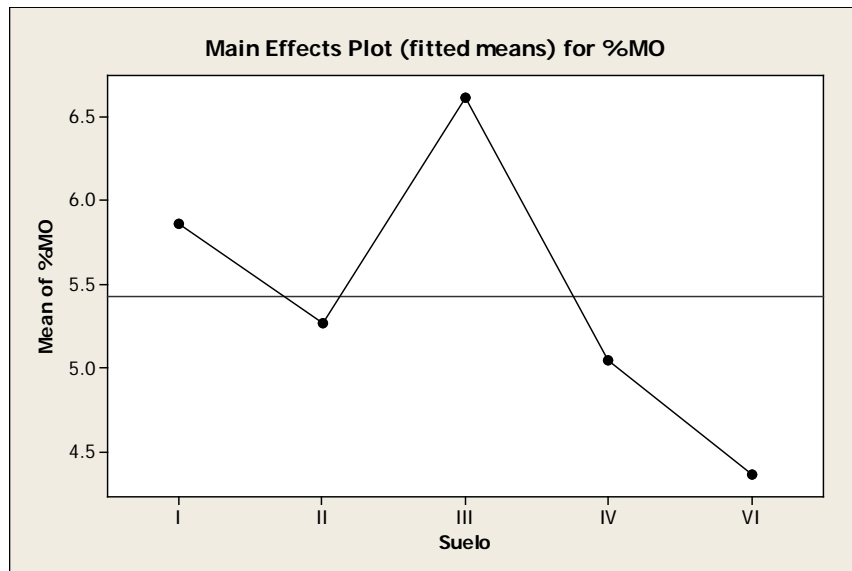


Figura 12. Gráfico de efectos principales para %MO



En cuanto a los valores de conductividad eléctrica de los suelos estudiados corresponden en gran medida con los valores de pH, ya que a

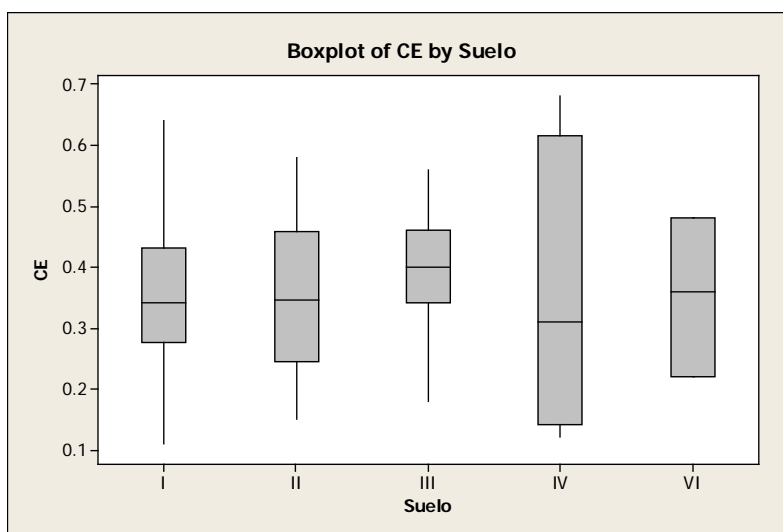
medida que los suelos son más ácidos la conductividad eléctrica tiende a ser más baja, debido a la pérdida de los cationes más solubles de los suelos. Por esto, el hecho de que la media de la conductividad eléctrica sea de 0.36 dS/m, lo que corresponde a suelos sin problemas de salinidad, es congruente con los valores de pH.

Tabla 7. Análisis de varianza para CE

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Suelo	4	0.02315	0.02315	0.00579	0.33	0.854
Error	74	1.28332	1.28332	0.01734		
Total	78	1.30647				

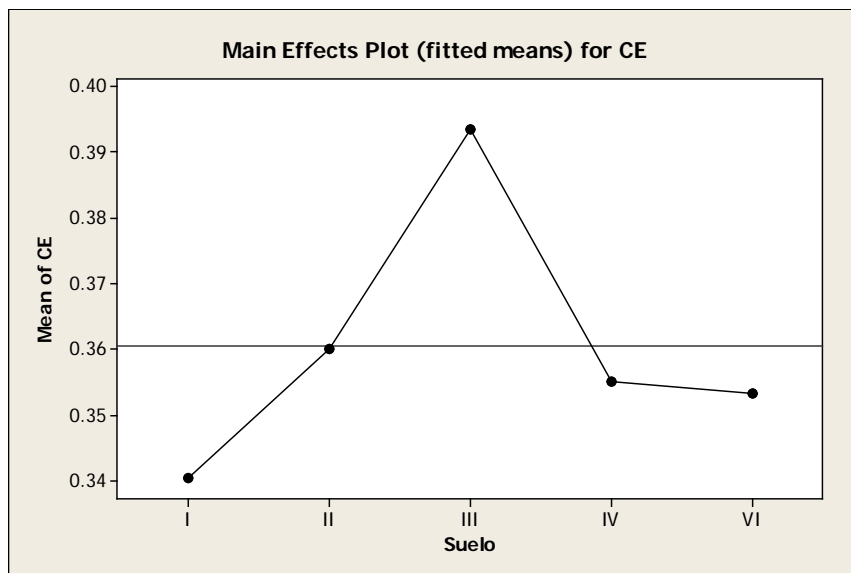
Sin embargo, tampoco se observa (tabla 7) que exista diferencia estadística significativa de este parámetro por tipo de suelo. En las figuras 13 y 14 se puede observar la concordancia con lo anterior, ya que en el diagrama de cajas y bigotes se notan valores muy cercanos de la mediana por tipo de suelo, mientras que en el gráfico de efectos principales para la conductividad eléctrica solamente el valor en los suelos III, alfisoles, es ligeramente más elevada, sin que se presente significancia. Por lo tanto, tampoco a la conductividad eléctrica la podemos considerar como un factor que pueda ser un indicador de la calidad del suelo.

Figura 13. Diagrama de cajas y bigotes para CE por tipo de suelo



Pero si es de considerar que estos suelos tampoco presentan problemas de manejo en cuanto a su cantidad de sales, lo que es importante debido a la gama de cultivos que pueden establecerse en suelos sin problemas de salinidad.

Figura 14. Gráfico de efectos principales para CE



En el caso de los contenidos de arena, limo y arcilla es lógico que los resultados presenten diferencia estadística significativa  $p=0.05$  (arena, tabla 8) o estén muy cerca de tenerla (tablas 9 y 10).

Tabla 8. Análisis de varianza para % Arena

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Suelo	4	1768.8	1768.8	442.2	3.33	0.014
Error	74	9813.9	9813.9	132.6		
Total	78	11582.8				

Tabla 9. Análisis de varianza para % Limo

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Suelo	4	415.03	415.03	103.76	1.77	0.144
Error	74	4335.44	4335.44	58.59		
Total	78	4750.47				

Tabla 10. Análisis de varianza para % Arcilla

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Suelo	4	1820.6	1820.6	455.1	2.28	0.068
Error	74	14763.1	14763.1	199.5		
Total	78	16583.7				

Las características texturales de los suelos del municipio reflejan esta situación, ya que la mayoría de los suelos son arcillosos o presentan alguna clase de textura franca. Y los gráficos de distribución de arena por tipo de suelo (figuras 15 y 16) reflejan esta condición. Lo mismo sucede con las figuras 17 a 20, pero esto es lógico desde el punto de vista edafológico, por lo que no podría tomarse como un criterio para considerar la clase textural como un indicador de la calidad del suelo.

Figura 15. Diagrama de cajas y bigotes para % arena por tipo de suelo

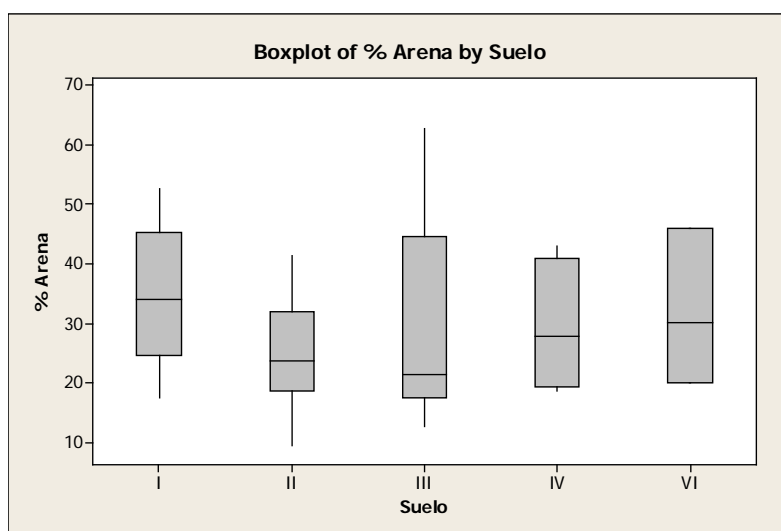


Figura 16. Gráfico de efectos principales para % Arena

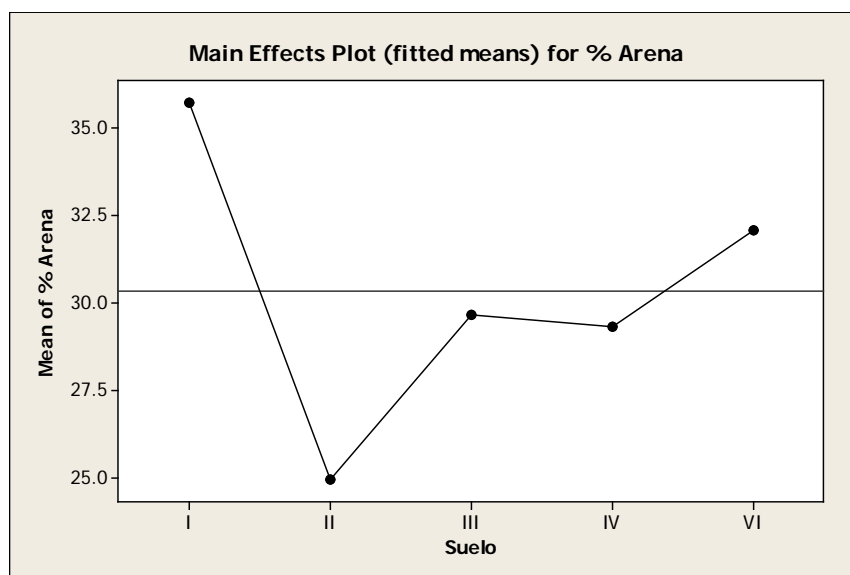


Figura 17. Diagrama de cajas y bigotes para % limo por tipo de suelo

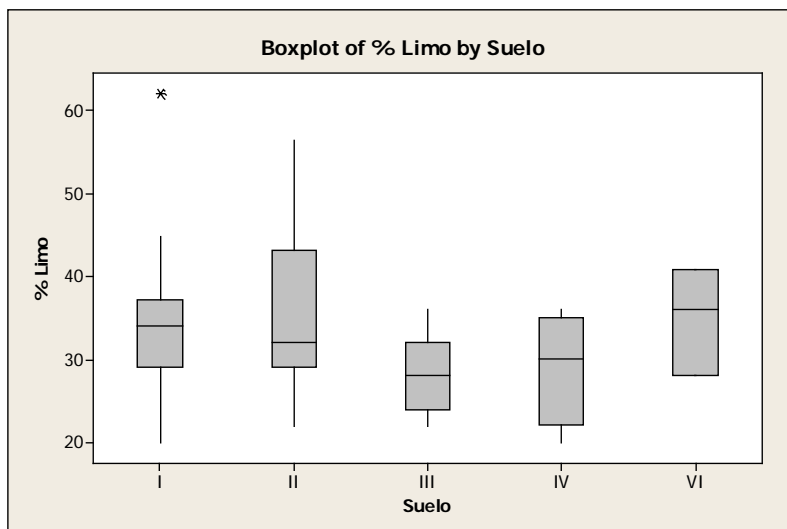
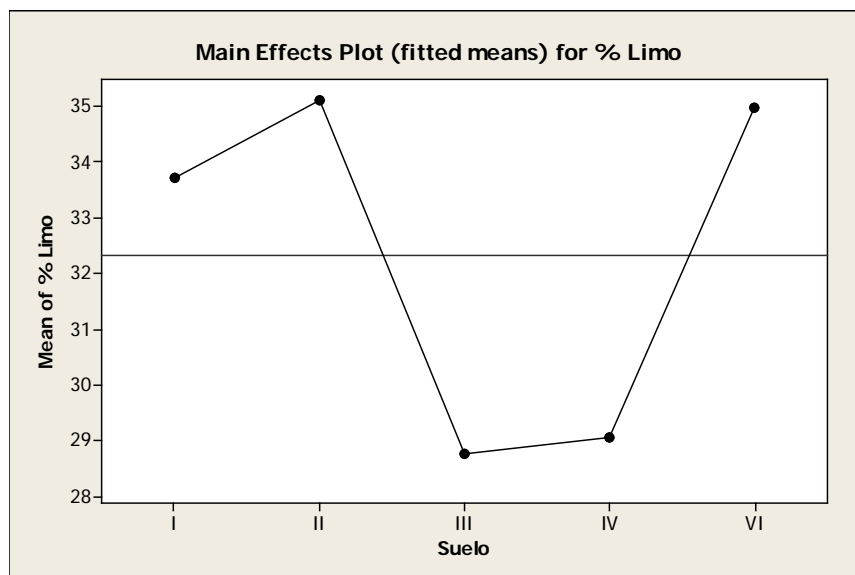


Figura 18. Gráfico de efectos principales para % limo



Sin embargo, desde el punto de vista del manejo de los suelos de la zona la predominancia de suelos arcillosos o franco arcillosos representa una dificultad, ya que para cultivos agronómicos las prácticas de manejo y conservación son más intensas y difíciles de aplicar y de mantener, su drenaje no es bueno y el tipo de reacción del suelo, de muy fuertemente ácido a neutro, implica que su fertilidad natural sea baja o media.

Figura 19. Diagrama de cajas y bigotes para % arcilla por tipo de suelo

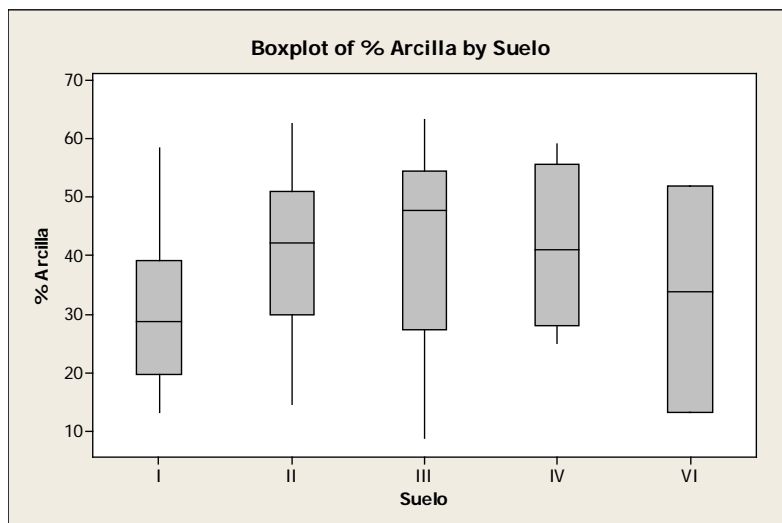
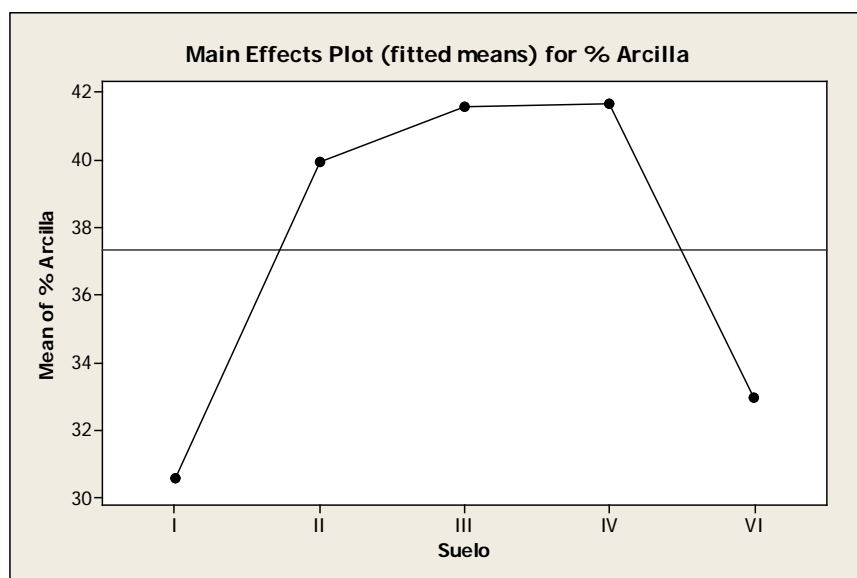


Figura 20. Gráfico de efectos principales para % arcilla



Con respecto al contenido de nitrógeno de los suelos de Xochitlán su media es de 0.25% que se interpreta como suelos con un contenido alto de acuerdo a la NOM-021. Aun cuando este resultado concuerda con el elevado contenido de materia orgánica de los suelos, se debe recordar que la variabilidad del nitrógeno en los suelos también es muy alta, debido a todos los procesos químicos y microbiológicos que afectan la dinámica de este

elemento, por lo que es difícil que exista una significancia estadística del elemento con el tipo de suelo (tabla 11).

Tabla 11. Análisis de varianza para % N

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Suelo	4	0.05509	0.05509	0.01377	0.76	0.554
Error	74	1.33974	1.33974	0.01810		
Total	78	1.39483				

Figura 21. Diagrama de cajas y bigotes para % N por tipo de suelo

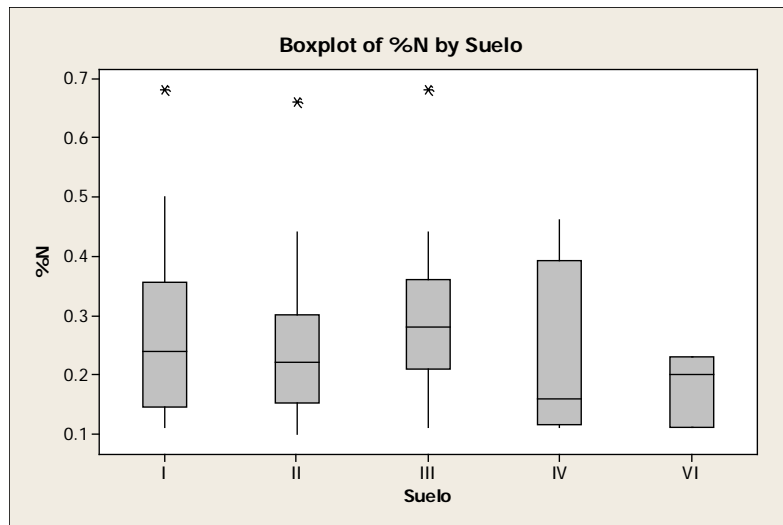
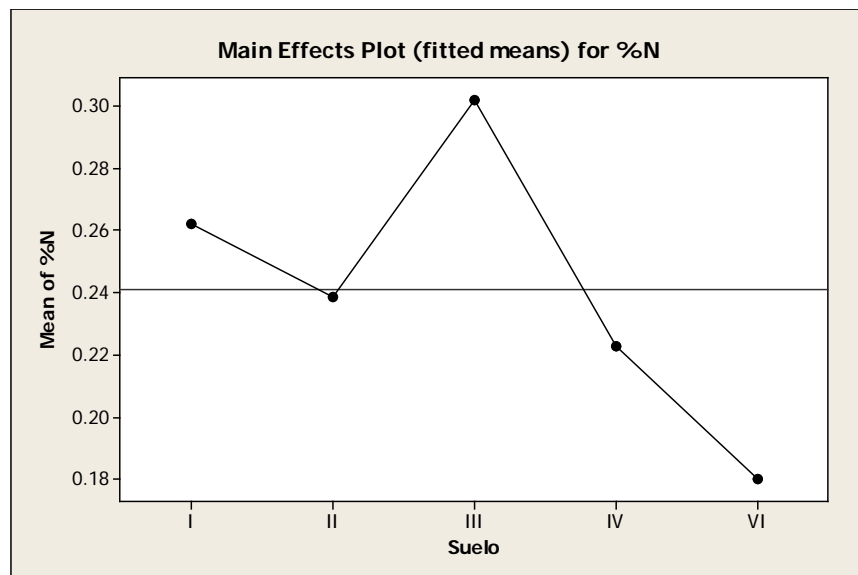


Figura 22. Gráfico de efectos principales para % N



Esto se corrobora en las figuras 21 y 22 donde se ve la existencia de una alta variabilidad del contenido de nitrógeno en los tipos de suelos, por lo que tampoco es una variable útil como indicador de la calidad del suelo por tipo de suelo.

En el caso de las bases Ca y Mg las medias que se obtuvieron para los suelos de la región fueron de 5.8 y 2.2, respectivamente, en ambos casos la interpretación de estos valores de acuerdo a la norma es de valores medios. En concordancia con lo comentado para los valores de la reacción del suelo y de la conductividad eléctrica, son valores que entran dentro de la lógica de las condiciones climáticas y topográficas de la zona, ya que aun cuando la solubilidad de estos cationes no es tan elevada como la del Na y K el fuerte intemperismo a que son sometidos los suelos de la zona produce que no se encuentren en cantidades elevadas en los suelos.

Tabla 12. Análisis de varianza para Ca

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Suelo	4	17.172	17.172	4.293	1.49	0.213
Error	74	212.698	212.698	2.874		
Total	78	229.870				

Tabla 13. Análisis de varianza para Mg

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Suelo	4	0.4698	0.4698	0.1175	0.19	0.944
Error	74	46.2279	46.2279	0.6247		
Total	78	46.6977				

Los resultados que se muestran en las tablas 12 y 13 tampoco indican que exista significancia estadística para ambos elementos por tipo de suelo, lo que se observa también en las gráficas 23 a 26. Aun cuando para Ca se observa una diferencia en los valores obtenidos para los entisoles, esto también concuerda con la formación de este tipo de suelos que en la clasificación de la FAO corresponden a órdenes como Fluvisoles o Litosoles; en general, tampoco se pueden utilizar estas variables como indicadores de la calidad del suelo para la región.

Por lo discutido anteriormente, de los parámetros estudiados se concluye que no es posible integrar un conjunto de indicadores de la calidad

del suelo por tipo de suelo en el municipio de Xochitlán con la técnica empleada.

Figura 23. Diagrama de cajas y bigotes para Ca por tipo de suelo

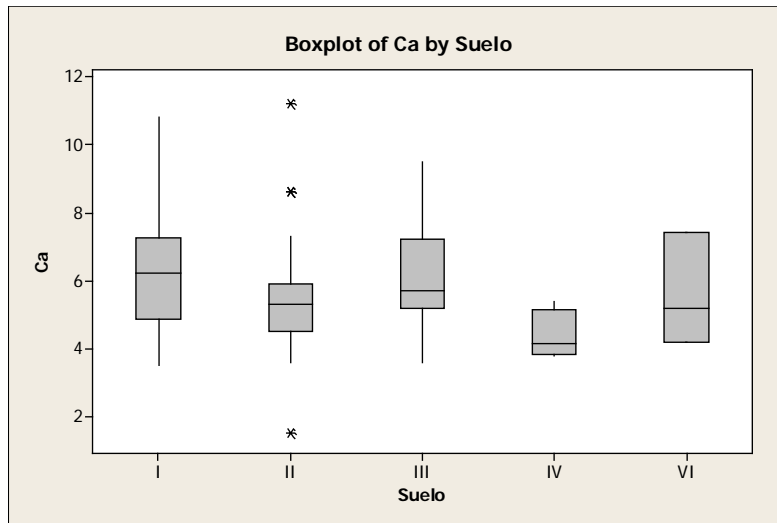


Figura 24. Gráfico de efectos principales para Ca

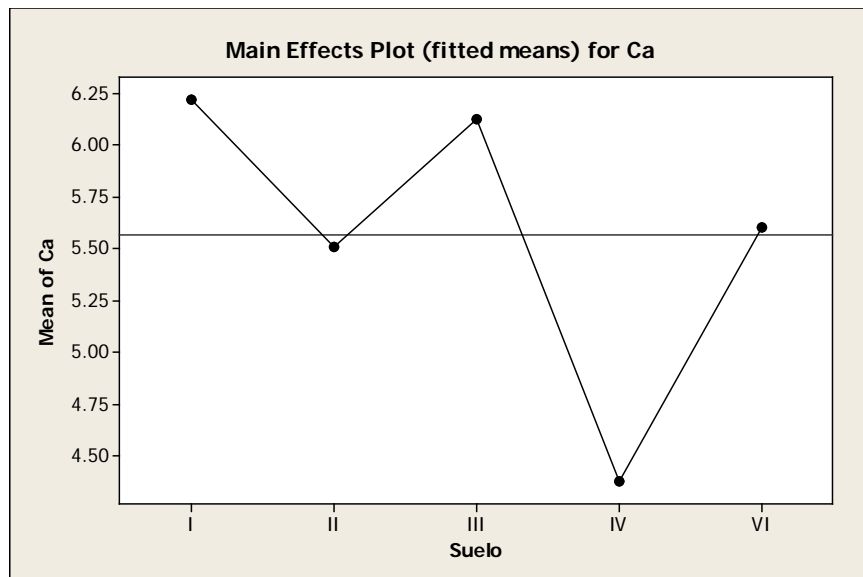


Figura 25. Diagrama de cajas y bigotes para Mg por tipo de suelo

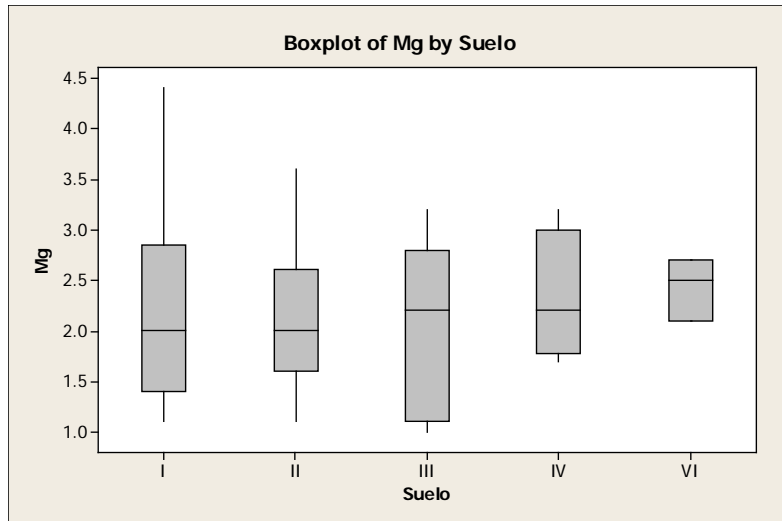
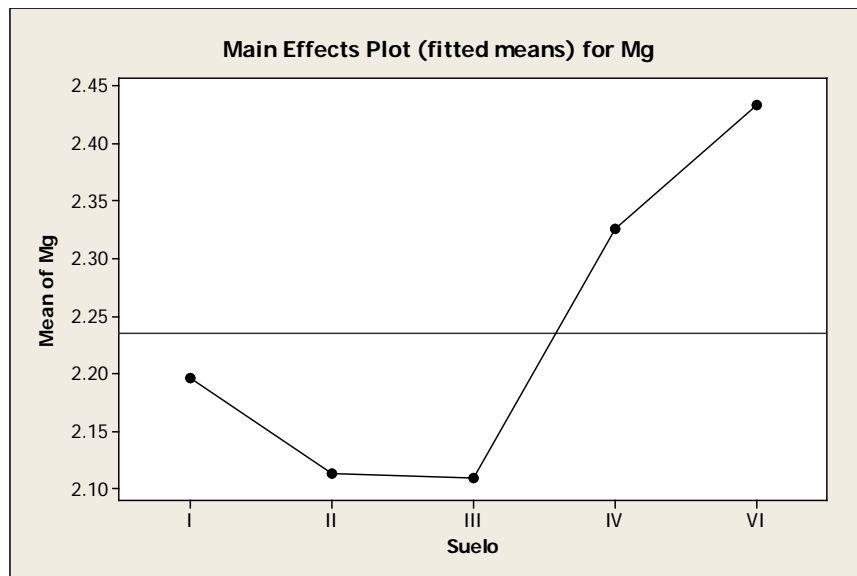


Figura 26. Gráfico de efectos principales para Mg



Ahora bien, al no obtenerse un conjunto de indicadores de calidad del suelo por tipo de suelo para el municipio se intentó buscar un conjunto de indicadores para el principal cultivo que se desarrolla en la zona, que es el café. Siguiendo los criterios establecidos por Escamilla et al., (1993) y Perfecto (1996).

De acuerdo a estos criterios se deben seguir las siguientes consideraciones para el buen desarrollo del cultivo. El clima, el régimen pluvial donde se considera apropiada para el cultivo una cantidad de lluvia comprendida entre los 1.800 y los 2.800 milímetros anuales, con una buena distribución en los diferentes meses del año. Se requieren por lo menos 120 milímetros al mes. El exceso de lluvias también puede afectar la floración del cafetal, disminuyéndola o dañándola, así como la existencia de sequías excesivas provoca que las hojas del cafeto puedan caerse y se puede incrementar el ataque de plagas como la arañita roja, el minador y la broca. También son importantes la humedad relativa, los vientos que, en general, las zonas más adecuadas para el cultivo del cafeto se caracterizan por presentar vientos de poca fuerza y, también la nubosidad.

De los parámetros que se estudiaron son importantes para este estudio los relativos al suelo. El suelo es esencial para el cafeto porque le facilita el anclaje y le proporciona el agua y los nutrimentos necesarios para su crecimiento, desarrollo y producción. Entre las propiedades físicas del suelo importantes para el café se encuentran: el color, en términos generales, el color negro de los suelos indica un buen contenido de materia orgánica, los suelos oscuros son los mejores para el café y los cultivos, en general; la textura, para el caso del café los mejores suelos para el cultivo son los llamados francos, debido al drenaje, porosidad y la cantidad de nutrientes, que le proporcionan al cultivo entre otras características; la estructura, que para el cafeto la mejor es la de tipo granular; la porosidad y la permeabilidad, ya que los mejores suelos para el café son los francos, en los cuales la permeabilidad es moderada; la profundidad efectiva, la cual es la distancia hasta donde las raíces de la planta pueden penetrar fácilmente en busca de agua y alimento, a mayor profundidad efectiva del suelo mejor será el desarrollo radical del cafeto y se considera que un suelo para cultivar café es profundo si permite la penetración de las raíces hasta 80 centímetros. En resumen, en cuanto a propiedades físicas los mejores suelos para el

cultivo del cafeto son los francos, de buena profundidad efectiva, con estructura granular, buena aireación y permeabilidad moderada.

En cuanto a las propiedades químicas de los suelos adecuadas para el cultivo del café tenemos: el pH, los suelos buenos para café deben tener una acidez entre 5 y 5.5. ya que al café no le convienen suelos con valores de la acidez por debajo de 5 o por encima de 5.5, pues se dificulta la nutrición del cultivo; la fertilidad del suelo, que está relacionada con la cantidad disponible de nutrimentos para las plantas, los elementos nutritivos que el cafeto requiere en mayor cantidad son nitrógeno, fósforo y potasio, y necesita en menor cantidad de calcio y magnesio y otros elementos, en general, la carencia de alguno de estos nutrimentos afecta el normal crecimiento y desarrollo de la plantación cafetera al igual que su producción potencial, tanto en calidad como en cantidad de café; la materia orgánica tiene mucha importancia para obtener una alta productividad del cultivo, influye en forma decisiva en el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo, favorece la retención de humedad y es el principal sustrato para el desarrollo de pequeños organismos que la transforman en una gran fuente de alimento para el cafeto, los suelos buenos para cultivar café deben tener contenidos de materia orgánica mayores al 8%.

En general, se puede decir que para el cultivo del cafeto son más importantes las buenas condiciones físicas del suelo que su fertilidad natural.

De acuerdo a lo anterior se estableció un procedimiento para elaborar un indicador o índice de calidad de suelo para el caso del cultivo de café en el municipio de Xochitlán de Vicente Suárez. Este consistió en, primero, observar propiedades físicas y químicas de los suelos y establecer rangos o clases de esas propiedades que permitieran evaluar la calidad de suelo para el cultivo de cafeto.

Los rangos que se establecieron para los parámetros estudiados fueron de acuerdo a las características dadas por Escamilla *et al.* (1993) y Perfecto (1996), el cultivo de cafeto requiere de suelos que cumplan con las siguientes características:

pH	valores entre 5 y 5.5
MO	valores por arriba de 8
CE	valores por debajo de 1.0
Clase textural	suelos francos o franco limosos
%N	valores arriba de 0.15
Ca	valores por arriba de 5
Mg	valores por arriba de 1.3

Posteriormente se establecieron para cada una de estas características (variables observadas en los 79 puntos de muestreo del estudio) dos clases y se codificaron como:

- 1: Cumple el rango o clase recomendado
- 0: No cumple

A partir de la siguiente expresión se realizaron los cálculos para cada indicador:

$$\text{Indicador} = \frac{((\text{Sum}(\text{Variables})) - \text{Valor Min})}{(\text{Valor Max} - \text{Valor Min})} \cdot 100$$

donde:

**Sum:** símbolo de sumatoria.

**Variables:** variables categorizadas observadas en el parámetro investigado.

**V<sub>MAX</sub>, V<sub>MIN</sub>:** valores máximo y mínimo de las variables que dependen de la codificación seleccionada y del número de variables.

**100:** factor porcentual.

A través de esta expresión matemática y de su resultado, el conjunto de variables cualitativas que caracterizan al objeto estudiado se convierte en una sola variable cuantitativa. Esta variable, que llamaremos “indicador de la calidad de suelo para el cultivo del café”, es un porcentaje y, por la forma en que se ha definido, puede interpretarse que a mayor porcentaje es mejor la calidad del suelo para ese cultivo. Puede considerarse como un “indicador sintético” al tener en cuenta un conjunto de variables.

En seguida se calculan los estadísticos descriptivos del indicador y se utilizan estos estadísticos para proponer una categorización de la calidad del cultivo bajo estudio. En el caso del cultivo del café, con los datos de la zona estudiada con características climáticas determinadas y utilizando cuartiles, puede proponerse la siguiente categorización para evaluar la calidad de suelo para el cultivo del café:

**Baja:** por debajo de 42%

**Media:** Entre 42% y 57%

**Alta:** entre 57% y 71%

**Muy Alta:** por arriba de 71%

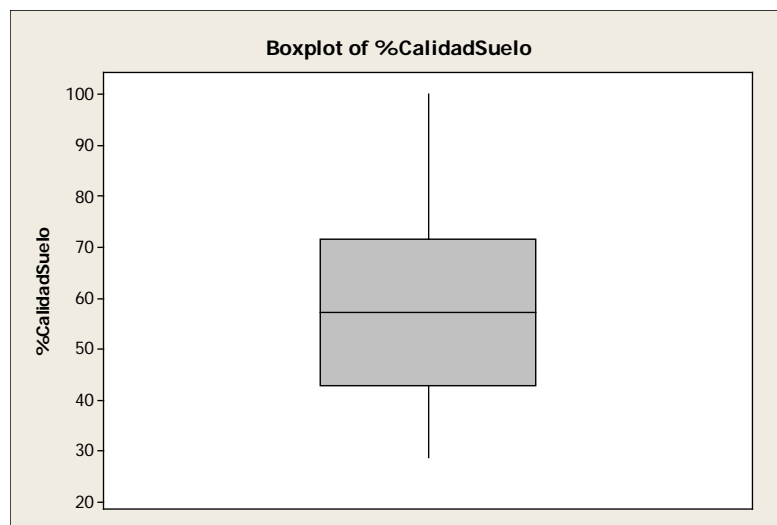
En la tabla 14 se muestran los resultados de la estadística descriptiva por tipo de suelo y los valores obtenidos para los cuartiles primero y tercero para la calidad de suelo en el caso del cultivo de café para el municipio.

Tabla 14. Estadística descriptiva para Calidad del Suelo en café

Variable	Suelo_Ordenado	Total						
		Count	Media	StDev	Minimum	Maximum		
%Calidad Suelo	I	29	60.10	20.34	28.57	100.00		
	II	32	56.25	13.55	28.57	85.71		
	III	11	53.25	9.24	42.86	71.43		
	IV	4	46.43	13.68	28.57	57.14		
	VI	3	57.14	14.29	42.86	71.43		
	Total							
Variable	Count	Media	StDev	Minimum	Q1	Mediana	Q3	Maximum
%Calidad Suelo	79	56.78	16.01	28.57	42.86	57.14	71.43	100.00

En las figuras 27 y 28 se muestran también los gráficos de cajas y bigotes para la distribución de los resultados de calidad del suelo para café según los criterios establecidos. De acuerdo a esto se observa que los suelos que se encuentran en los cuartiles 3 y 4, es decir, calidad alta y muy alta de los suelos para el cultivo del café, son la mayoría de los sitios estudiados en el municipio. Esto es, de acuerdo a sus características la mayoría de los suelos son adecuados para este cultivo

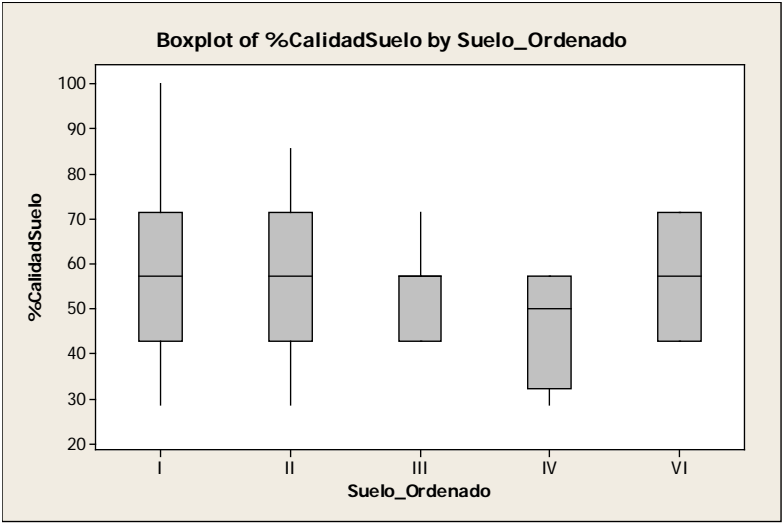
Figura 27. Resultado General de Calidad de Suelo para el cultivo de café.



Si se analizan los datos por tipo de suelo se encuentra que los suelos de tipo I, II y III son adecuados para el cultivo, esto es, andisoles, inceptisoles y alfisoles, mientras que los entisoles son suelos de calidad media y baja para este cultivo.

Por lo tanto, es posible, partiendo de las características adecuadas para el cultivo del café, establecer suelos de calidad baja, media, alta o muy alta para este cultivo en el municipio de Xochitlán de Vicente Suárez.

Figura 28. Resultado General de Calidad de Suelo para el cultivo de café por tipo de suelo.



## **7. Conclusiones.**

De acuerdo al primer objetivo, no fue posible, con los parámetros que se estudiaron y la metodología utilizada, establecer un conjunto mínimo de indicadores de la calidad del suelo en el municipio de Xochitlán de Vicente Suárez.

Aun cuando existe una variación de los parámetros estudiados por tipo de suelo en el municipio, esta no presentó significancia estadística por lo que tampoco se pudo establecer que exista de manera concluyente una variación por tipo de suelo.

Los suelos del municipio presentan características físicas y químicas adecuadas para varios tipos de cultivos y, por lo tanto es necesario un manejo y prácticas de conservación para los suelos, ya que por las características topográficas de la región son suelos frágiles, en el sentido de que la deforestación permite que estos suelos puedan perderse rápidamente.

Por las características físicas y químicas de los suelos, si es posible establecer una categorización de suelos de buena, media, alta y muy alta calidad para el cultivo del café en los suelos del municipio.

Aun cuando la fertilidad de los suelos del municipio no es muy alta, por las características climáticas y topográficas del lugar son suelos de vocación forestal y agroforestal, la implementación de otro tipo de actividades productivas en la zona afectaría no sólo a este recurso natural de manera casi irreparable, sino también la biodiversidad y los recursos hídricos debido a que es una zona muy vulnerable a las alteraciones climáticas y a los desastres naturales como ya se ha visto en años recientes, a finales de la década de los años noventa.

## 8. Bibliografía.

Acton , D.F. y L.J. Gregorich (eds). 1995. *The health of our soils: Toward sustainable agriculture in Canada*. Centre for Land and Biological Resources Research. Research Branch. Agric. and Agri-Food Canada, Ottawa, ON. <http://res.agr.ca/CANSIS/PUBLICATIONS/HEALTH/>

Aguilar, S.A., Etchevers, B.J.D. y J.Z. Castellanos (eds.). 1987. *Análisis Químico para Evaluar la Fertilidad del Suelo*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación Especial no. 1.

Allan, D.L. y R.Killorn. 1996. "Assessing Soil Nitrogen, Phosphorus, and Potassium for Crop Nutrition and Environmental Risk". En: Doran, J,W. y A.J.Jones (eds) *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication No. 49, Madison, WI.

Altieri, M.A. y C.I. Nicholls. 2002. Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales. *Manejo Integrado de plagas y agroecología* 64:17-24.

Arshad, M.A.; Lowery, B. y B.Grossman. 1996. "Physical Tests for Monitoring Soil Quality". En: Doran, J,W. y A.J.Jones (eds) *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication No. 49, Madison, WI. pp.123-141.

Ayuntamiento de Xochitlán, 1992. *Xochitlán de Vicente Suárez*. Monografía. Edición Visión Cultural S.A. 48pp.

Batjes, N.H. 1999. *Management Options for Reducing CO<sub>2</sub>-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 Centre, 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> (versión noviembre de 1999).

Bezdicsek, D.F.; Papendick, R.L. y R. Lal. 1996. "Introduction: Importance of Soil Quality to Health and Sustainable Land Management". En: Doran, J,W. y A.J.Jones (eds) *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication No. 49, Madison, WI.

Bouma, J. 1997. "Soil Environmental Quality: A European Perspective". *J. Environ. Qual.* 26: 26-31.

Calderón, M.A.; Moreno M.M. y J. Etchevers. 2002. Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Agrociencia* 36:605-620.

Campitelli, P.; Aoki, A.; Gudelj, O.; Rubenacker A. y R. Sereno. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Suelo* 28:223-231.

Carter, M.R.; Gregorich, E.G.; Anderson, D.W.; Doran, J.W.; Janzen, H.H. y F.J.Pierce. 1997. "Concepts of Soil Quality and their Significance". En: Gregorich, E.G and Carter, M.R (eds.) *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science* 25. Elsevier Sc.

Cressie, N.A.C. 1993. *Statistics for Spatial Data*, pp. 1-26. J.Wiley & Sons.

Dahlgren, R.A.; Saigusa, M. y F.C. Ugolini. 2004. The nature, properties and management of volcanic soils. *Adv. Agron.* 82:113-182.

Dick, R.P., Thomas, D.R. y J.J. Halvorson. 1996. "Standardized Methods, Sampling, and Sample Pretreatment". En: Doran, J,W. y A.J.Jones (eds) *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication No. 49, Madison, WI. pp.107-121.

Doran, J.W. 2002. Soil health and global sustainability: translating science into practice. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88:119-127.

Doran, J.W. y T.B.Parkin. 1994. "Defining and Assessing Soil Quality". En: Doran, J.W; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F. and B.A.Stewart (eds) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Sci. Soc. Am. Sp. Pub. No. 35. Am. Soc. of Agron., Madison, Wisc. USA. pp. 3-21.

Doran, J.W. y T.B.Parkin. 1996. "Quantitative Indicators of Soil Quality: A Minimum Data Set". En: Doran, J,W. y A.J.Jones (eds) *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication No. 49, Madison, WI. pp. 25-37.

Doran, J.W.; Sarrantonio, M. y M.A.Leibig. 1996. "Soil Health and Sustainability". En D.L. Sparks (ed): *Advances in Agronomy* 56:1-54.

Doran, J.W.; Stamatiadis, M. y J.Haberern. 2001. Soil health as an indicator of sustainable management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 1824:1-4.

Dubrule, O. 1994. Estimating or choosing a geostatistical model. En: Dimitrakopolus R. (ed). *Geostatistics for the next century*. Springer Verlag. pp. 3-14.  
Dumanski, J. 1997. *Criteria and Indicators for Land Quality and Sustainable Land Management*.

Escamilla P. E.; Diaz, C.S.; Licona, V.A.; Rodríguez, R.L.; Santoyo, C.V. y R. Sosa, 1993. Los sistemas de producción de café en el centro de Veracruz, México. Un análisis tecnológico. En SEMARNAP- Fundación Friedrich Ebert. *Alternativas al manejo de laderas en Veracruz*. 1995. México D.F., pp: 287-304.

Eswaran, H.; Vandenberg, E. y P. Reich. 1993. Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci.Soc. Am. J.* 57:192-194.

García, Y; Ramírez, W. y S. Sánchez. 2012. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes* 35:125-138.

García, E. 1989. *Apuntes de Climatología*. México, D.F. 6ª ed.

García-Ruiz, R; Ochoa, V.; Hinojosa, B. y J. A. Carreira. 2008. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems. *Soil Biol. & Biochem.* 40:2137-2145.

Giacometti, C.; Demyan, M.S.; Cavani, L.; Marzadori, C.; Ciavatta, C. y E. Kandeler. 2013. Chemical and microbiological soil quality indicators and their potential to differentiate fertilization regimes in temperate agroecosystems. *Applied Soil Ecology* 64:32-48.

Goovaerts, P. 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biol. Fertil. Soils* 27:315-334.

Goovaerts, P. 1999. "Geostatistics in Soil Science: state-of-the-art and perspectives". *Geoderma* 89:1-45.

Goovaerts, P. y A.G. Journel. 1995. Integrating soil map information in modeling the spatial variation of continuous soil properties. *Eur. J. Soil Sci.* 46:397-414.

Govaerts, B.; Sayre K. D. y J. Deckers. 2006. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil & Tillage Research* 87:163-174.

Gray, C. 2013. Soil Quality in Marlborough 2007-2012. MDC Technical Report No. 13-004. <http://www.marlborough.govt.nz>

Halvorson, J.J.; Smith, J.L. y R.I. Papendick. 1996. Integration of multiple soil parameters to evaluate soil quality: a field example. *Biol. Fertil. Soils* 21:207-214.

Halvorson, J.J.; Smith, J.L. y R.I. Papendick. 1997. Issues of Scale for Evaluating Soil Quality. *Journal of Soil and Water Conservation* :26-30.

Hergert, G.W. 1998. A Futuristic View of Soil and Plant Analysis and Nutrient Recommendations. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:1441-1454.

Instituto Nacional De Estadística, Geografía e Informática (INEGI)- Instituto Nacional de Ecología (INE). 2000. *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*.

Jenny, H. 1980. *The Soil Resource*. Springer-Verlag, New York, USA.

Journel, A.G y C.J.Huigbrets. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, NY, USA.

Kaluzny, S.P. 1997. *S + Spatial Stats*. User's manual for Windows and Unix. Springer-Verlag.

Karlen, D.L; Andrews, S.S. y J.W. Doran. 2001. Soil Quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy* 74:1-40.

Karlen, D.L; Mausbach, M.J.; Doran, J.W.; Cline, R.G.; Harris, R.F. y G.E. Schuman. 1997. "Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10.

Laird, D.A. y C. Chang. 2013. Long-term impacts of residue harvesting on soil quality. *Soil & Tillage Research* 134:33-40.

Lal, R. 1995. "Trends in world agricultural use. Potential and constraints". En: Lal, R. y B.A. Stewart (eds) *Soil Management, Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. CRC Press, p. 521-536.

Lal, R. 1998. *Soil Quality and Agricultural Sustainability*. En: Lal,R. (ed) *Soil Quality and Agricultural Sustainability*. Ann Arbor Press. pp. 3-12

Lal, R. 1999. *Soil Quality and Food Security: The Global Perspective*. En: Lal,R. (ed) *Soil Quality and Soil Erosion*. CRC Press. pp. 3-16.

Lamorey G. y E. Jacobsom. 1995. Estimation of semivariogram parameters and evaluation of the effects of data sparsity. *Mathematical Geology* 27:327-358.

Larson, W.E. y F.J.Pierce. 1994. "The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management". En: Doran, J.W; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F. and

B.A.Stewart (eds) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Sci. Soc. Am. Sp. Pub. No. 35. Am. Soc. of Agron., Madison, Wisc. USA. pp. 37-51.

Lima, A.C.R.; Brussaard, L.; Totola, M.R.; Hoogmoed, W.B y R.G.M. de Goede. 2013. A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality. *Applied Soil Ecology* 64:194-200.

Matus, F.; Rumpel, C.; Neculman, R.; Panichini, M. y M.L. Mora. 2014. Soil carbon storage and stabilisation in andic soils: A review. *Catena* 120:102-110.

Mausbach, M.J. y C.A. Seybold. 1998. Assessment of Soil Quality. En: Lal, R. (ed) *Soil Quality and Agricultural Sustainability*. Ann Arbor Press. pp. 33-43

Muller, S. 1996. *¿Cómo medir la sostenibilidad? Una propuesta para el área de la agricultura y de los recursos naturales*. GTZ/IICA. Serie Documentos de Discusión sobre Agricultura Sostenible y Recursos Naturales. No.1.

Muscolo, A.; Panuccio, M.R.; Mallamaci, C. y M. Sidari. 2014. Biological indicators to assess short-term soil quality changes in forest ecosystems. *Ecological Indicators* 45:416-423.

Oldeman, L.R. 1998. *Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation*. Working paper 88/4. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). Wageningen.

ONU. 1992. *Agenda 21*. Río de Janeiro, Brasil. <http://www.rolac.unep.mx/agenda21/esp/ag21inde.htm>

Ortiz, S.M.M; Anaya, G.M y J.W. Estrada. 1994. *Evaluación, Cartografía y Políticas Preventivas de la Degradación de la Tierra*. CP-UACH-CONAZA.

Paz , A. ; Taboada, M.T. y M.J. Gómez. 1996. Spatial variability in topsoil micronutrients contents in a one-hectare cropland plot. *Commun. Soil Sci. Plant Analt.* 27:479-503.

Pacheco, R.A.E. 2005. Determinación de la calidad del suelo en el rancho de Santa Ana, municipio de Tepeaca, estado de Puebla. Tesis. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Perfecto, I. 1996. Loss of Insect Diversity in a changing Agroecosystem: The Case of coffee Technification. In: Rice, A.R.; Harris M.A. y McLean J. (eds.). 1st. Sustainable Coffee Congress. Smithsonian Migratory Bird Center. Proceedings. Pp: 143-155.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2000. *GEO América Latina y el Caribe 2000. Perspectivas sobre el Medio Ambiente*. PNUMA/ORPALC. <http://www.rolac.unep.mx/evaluamb/esp/geoalc/resumen.htm>

Rice, C.W.; Moorman, T.B. y M.Beare. 1996. Role of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Soil Quality. En: Doran, J,W. y A.J.Jones (eds) *Methods for Assessing Soil Quality*. SSSA Special Publication No. 49, Madison, WI.

Romaniuk, R.; Giuffre, L. y R. Romero. 2011. A Soil Quality Index to Evaluate the Vermicompost Amendments Effects on Soil Properties. *Journal of Environment. Protection* 2:502-510.

Sabbe, W.E. y D.B. Marx. 1987. Soil Sampling: Spatial and Temporal Variability. En: Brown, J.R. (ed) *Soil Testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation*. SSSA Special Publication No. 21, Madison, WI. pp.1-14.

Schnug, E.; Panten, K. y S. Haneklaus. Sampling and Nutrient Recommendations-The Future. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 29:1455-1462, 1998.

Secretaría de Gobernación. 1988. *Los Municipios de Puebla*. Colección Enciclopedia de los Municipios de México. pp 1094-1099.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2000. Norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*, abril de 2003.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2012. Informe de la situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Capítulo 3. Suelos pp.119-154. México, 2013.

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). 2000. *Semarnap Quincenal*. Año 3. No. 62. 2 junio 2000. <http://www.semarnap.gob.mx/quincenal/qui-62/cifras.htm>

Shukla, M.K.; Lal, R. y M. Ebinger. 2006. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Tillage Research* 87:194-204.

Sims, J.T; Cunningham, S.D. y M.E. Sumner. 1997. "Assessing Soil Quality for Environmental Purposes: Roles and Challenges for Soil Scientists". *J. Environ. Qual.* 26: 20-25.

Smith, J.L.; Halvorson, J.J. y R.I. Papendick. 1993. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:743-749.

Smith, J.L.; Halvorson, J.J. y R.I. Papendick. 1994. "Multiple Variable Indicator Kriging: A Procedure for Integrating Soil Quality Indicators". En: Doran, J.W; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F. and B.A.Stewart (eds) *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Sci. Soc. Am. Sp. Pub. No. 35. Am. Soc. of Agron., Madison, Wisc. USA.

Soil Science Society of America. 1995. "Statement on Soil Quality". *Agronomy News*, June.

Syers, J.K.; Hamblin, A. y E. Pushparajah. 1994. Development of Indicators and Tresholds for the Evaluation of Sustainable Land Management. *Transactions. 15<sup>th</sup> World Congress of Soil Science*, México. Vol. 6a. pp. 398-409.

UNEP. 2012. The Fifth Global Environment Outlook Report. Chapter 3: Land. Managing increasing pressures on Land. <http://www.unep.org/geo>

Wang, X. y Gong, Z. 1998. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma* 81:339–355.

Warkentin, B.P. 1995. "The changing concept of soil quality". *Journal of Soil and Water Conservation* 50 (3):226-228.

Warrick, A.W.; Myers, D.E. y D.R. Nielsen. 1986. Geostatistical Methods Applied to Soil Science. En *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, pp. 53-82.

Winograd, M. 1995. Marco conceptual para el desarrollo y uso de indicadores ambientales y de sustentabilidad para toma de decisiones en Latinoamérica y el Caribe. Documento para discusión. *Taller Regional sobre uso y desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad*. PNUMA-CIAT. México, D.F.

Xye, T. y D.E. Myers. 1995. Fitting matrix-valued variogram models by simultaneous diagonalization (Part 1: Theory). *Mathematical Geology* 27:867-875.

Yao, R.; Yang, J.; Gao, P.; Zhang, J. y W. Jin. 2013. Determining minimum data set for soil quality assessment of typical salt-affected farmland in the coastal reclamation area. *Soil & Tillage Research* 128:137-148.

Zhang, R.; Myers D.E. y A. W. Warrick 1992. Estimation of the spatial distribution of soil chemicals using pseudo-cross-variograms. *Soil Sci. Soc. Am J.* 56:1444-1452.