





**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

---

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

Colegio de Ingeniería Ambiental

**Características físicas y químicas en suelos de  
cultivo de las regiones de Acatzingo y  
Tochimilco, Puebla, para determinar su fertilidad**

Tesis profesional para obtener el título de Ingeniero  
Ambiental

Presentado por:

**Concepción Valdivia Carranco  
Marco Antonio Rodríguez Cabrera**

Directora de Tesis:

**M.C. María Noemí Bonilla y Fernández**

Coasesora de Tesis:

**Dra. Sonia Emilia Silva Gómez**

Abril 2015



**BUAP**

**Oficio No. FIQ/AC/346/2015**

Asunto: Prórroga de Registro de Tema de Tesis

**C. CONCEPCIÓN VALDIVIA CARRANCO  
PASANTE DE LA LICENCIATURA  
EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
P R E S E N T E:**

Por medio del presente me permito informarle de la Prórroga de Registro del Tema de Tesis Profesional de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo Título es el siguiente:

**“CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS EN LOS SUELOS DE CULTIVO DE LAS  
REGIONES DE ACATZINGO Y TOCHIMILCO, PUEBLA, PARA DETERMINAR SU  
FERTILIDAD”**

**INTRODUCCIÓN**

<b>CAPÍTULO I</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>

**CONCLUSIONES  
BIBLIOGRAFÍA**

Director de Tesis: M.C. María Noemí Bonilla y Fernández  
Co-Asesor de Tesis: Dra. Sonia Emilia Silva Gómez

Lo cuál me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR TRES MESES A PARTIR DEL 21 DE MARZO AL 21 DE JUNIO DE 2015.**

**A T E N T A M E N T E**  
**“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”**  
**H. Puebla de Z., 19 de marzo del 2015**

**M.I.C M.A. GPE. TITA VAZQUEZ E. DE LOS MONTEROS**  
**SECRETARIA ACADÉMICA**



C.c.p. Director de Tesis: M.C. María Noemí Bonilla y Fernández  
Co-Asesor de Tesis: Dra. Sonia Emilia Silva Gómez  
Archivo.

Facultad  
de Ingeniería  
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San  
Manuel, Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00  
Ext. 7250 y 7251



Oficio No. FIQ/AC/345/2015  
Asunto: Prórroga de Registro de Tema de Tesis

**C. MARCO ANTONIO RODRÍGUEZ CABRERA**  
**PASANTE DE LA LICENCIATURA**  
**EN INGENIERÍA AMBIENTAL**  
**P R E S E N T E:**

Por medio del presente me permito informarle de la Prórroga del Registro del Tema de Tesis Profesional de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo Título es el siguiente:

**“CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS EN LOS SUELOS DE CULTIVO DE LAS REGIONES DE ACATZINGO Y TOCHIMILCO, PUEBLA, PARA DETERMINAR SU FERTILIDAD”**

**INTRODUCCIÓN**

<b>CAPÍTULO I</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>METODOLOGÍA</b>
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>

**CONCLUSIONES**  
**BIBLIOGRAFÍA**

Director de Tesis: M.C. María Noemí Bonilla y Fernández  
Co-Asesor de Tesis: Dra. Sonia Emilia Silva Gómez

Lo cuál me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR TRES MESES A PARTIR DEL 24 DE MARZO AL 24 DE JUNIO DE 2015.**

**A T E N T A M E N T E**  
**“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”**  
**H. Puebla de Z., 19 de marzo del 2015**

  
**M.I.C MA. GPE. TITA VAZQUEZ E. DE LOS MONTEROS**  
**SECRETARIA ACADÉMICA**



C.c.p. Director de Tesis: M.C. María Noemí Bonilla y Fernández  
Co-Asesor de Tesis: Dra. Sonia Emilia Silva Gómez  
Archivo.

Facultad  
de Ingeniería  
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San  
Manuel, Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00  
Ext. 7250 y 7251



# Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA

LIC. Ma. Cristina Laura Gómez Aguirre.  
Directora de la Administración Escolar  
De la BUAP.  
Presente

ASUNTO:  
AUTORIZACIÓN  
IMPRESIÓN DE TESIS

Por este conducto me permito presentar a Ud. al C. pasante de la carrera de Ingeniería Ambiental

**Concepción Valdivia Carranco**

Quién presenta como tema de tesis:

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS EN SUELOS DE  
CULTIVO DE LAS REGIONES DE ACATZINGO Y TOCHIMILCO,  
PUEBLA, PARA DETERMINAR SU FERTILIDAD**

La cual ha sido debidamente revisada y se autoriza para su impresión correspondiente.  
Sin otro particular y para los fines que se estimen conducentes reitero mi distinción.

ATENTAMENTE

**“Pensar Bien, para Vivir Mejor”**

H. Puebla de Z., a 27 de Marzo de 2015

Director de Tesis  
M.C. Ma. Noemí Bonilla y Fernández

Coasesor de Tesis  
Dra. Sonia Emilia Silva Gómez



# Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

CIUDAD UNIVERSITARIA

LIC. Ma. Cristina Laura Gómez Aguirre.  
Directora de la Administración Escolar  
De la BUAP.  
Presente

ASUNTO:  
AUTORIZACIÓN  
IMPRESIÓN DE TESIS

Por este conducto me permito presentar a Ud. al C. pasante de la carrera de Ingeniería Ambiental

**Marco Antonio Rodríguez Cabrera**

Quién presenta como tema de tesis:

**“Características físicas y químicas en suelos de cultivo de las regiones de Acatzingo y Tochimilco, Puebla, para determinar su fertilidad”**

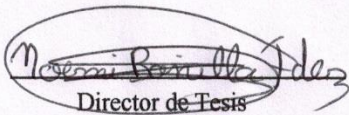
La cual ha sido debidamente revisada y se autoriza para su impresión correspondiente.

Sin otro particular y para los fines que se estimen conducentes reitero mi distinción.

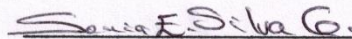
ATENTAMENTE

**“Pensar Bien, para Vivir Mejor”**

H. Puebla de Z., a 27 de Marzo del 2015

  
Director de Tesis

M.C. María Noemí Bonilla y Fernández



Coasesor de Tesis  
Dra. Sonia Emilia Silva Gómez

**Esta tesis se realizó gracias al apoyo de la RED PROMEP, Calidad Ambiental y Desarrollo Sustentable y al BUAP CA 165 “Desarrollo Sustentable”, como parte de su proyecto “Inventario de contaminantes y sus indicadores regionales” bajo la dirección de la M.C. Noemí Bonilla y Fernández y la Doctora Sonia Emilia Silva Gómez en el laboratorio de Química Ambiental del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.**

La siguiente investigación fue presentada en los siguientes eventos:

XII Congreso Internacional y XVII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales “La Tierra es nuestra casa, cuidémosla” SEDE: centro de convenciones Cibeles, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, Junio 2013.

III Seminario Multidisciplinario de Tecnología y Ciencia del ICUAP, Junio 2013.

XIII Congreso Internacional y XIX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales “Gestión sustentable, una necesidad ante el cambio climático” SEDE: EXPO & FORUM de Mundo Imperial Acapulco, Guerrero, México, Junio 2014.

Día Mundial del Suelo “Los suelos, cimiento para la agricultura familiar” SEDE: Unidad de seminarios BUAP, Puebla, Pue., Diciembre 2014.

## **Agradecimientos**

A Dios

A mis padres, por su trabajo, sus esfuerzos, sus regaños, consejos y guía que me han hecho una mejor persona, también por su incondicional cariño y amor que me brindan cada día.

A mis hermanos por su apoyo incondicional, por soportarme tantas cosas y por impulsarme a seguir superándome.

A mis tres corazones, mis sobrinos que son los que me brindan alegría, energía, paz, amor y me llenan de vida.

Al resto de mis familiares por su cariño, su apoyo y consejos para salir adelante en la vida.

A mis amigos, por ser mi segunda familia y demostrarme tanto afecto, cariño, apoyo y ánimos. Por compartir conmigo tantas locuras, alegrías, tristezas, esfuerzos, logros y tantas experiencias inolvidables. Gracias por su amistad incondicional.

A Marco, que si muchas veces nos enojamos, al final esta tesis no sería la misma sin él, porque dos cabezas son mejor que una y sin locuras, él trabajo hubiera sido aburrido.

A Aldo por todas las experiencias vividas, su apoyo y aliento en cada cosa que hago.

Gracias a todos ustedes y a cada persona que forma parte de mi vida, que sé que les alegra este logro en mi carrera y que seguirán alentándome para destacar en el mundo.

Los quiero.

Concepción Valdivia C.

## **Agradecimientos**

A la vida, que me ha permitido disfrutar y aprender de logros y derrotas y el día de hoy me da la oportunidad de sentirme satisfecho conmigo mismo por este gran paso que doy del cual sé que mucha gente se siente orgullosa.

A mi papá, que es mi ejemplo a seguir de trabajo y esfuerzo y que me ha enseñado valores tan importantes como lo es la honestidad y el amor, pero sobretodo me ha mostrado que el valor más importante es la familia.

A mi mamá, la mujer que me ha cuidado y amado toda mi vida, la que ha estado en cada logro personal que he tenido y la que me ha apoyado incondicionalmente, pero a la vez me ha hecho ver mis errores y me aconseja para que actúe de la mejor manera y cada día sea mejor persona.

A mis hermanas, Liz y Miriam, de quienes he aprendido que cualquier obstáculo que se presente se puede superar, siempre y cuando te esfuerces al máximo.

A mis sobrinos y cuñados, que siempre me han hecho ver que soy una persona importante para ellos y que soy capaz de alcanzar todas mis metas.

A mi amiga y compañera de tesis, Concepción Valdivia, por este tiempo que trabajamos juntos, que aunque hubo muchos enojos logramos terminar este desafío satisfactoriamente.

Y por último a mis amigos y compañeros en la universidad y en el laboratorio, gracias por hacer esta etapa inolvidable.

Los quiero.

Marco A. Rodríguez C.

Gracias a la M.C. Ma. Noemí Bonilla y Fernández por ser la asesora de esta tesis, por brindarnos sus conocimientos, su experiencia, su guía, sus críticas y su tiempo para que este trabajo se realizara de la mejor manera posible. A la coasesora de tesis la Dra. Sonia Emilia Silva Gómez por su apoyo en esta investigación, su dedicación y su paciencia. A la Dra. Janette Arriola Morales y a la M.C. Tania Meza Gaspar por su valioso apoyo en la revisión de esta tesis.

## RESUMEN

Uno de los usos principales de los suelos es la agricultura, pero debido al aumento poblacional la demanda de alimentos ha crecido de igual manera generando una gran explotación de los suelos agrícolas que junto con otros mecanismos de degradación de los suelos, como lo son la erosión hídrica y eólica, han afectado el estado de los mismos, lo cual se refleja en la baja productividad de los cultivos.

Esta problemática se encuentra en las regiones de Acatzingo y Tochimilco, Puebla afectando al cultivo de maíz, lo cual perjudica la economía de los agricultores y el autoconsumo que les proporcionan las cosechas.

El objetivo general de este trabajo fue la determinación de las características físicas y químicas de nueve parcelas de cultivo en las regiones de Acatzingo y Tochimilco, Puebla para determinar su fertilidad, implementando las metodologías de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

Los resultados obtenidos en la región de Acatzingo presentaron características físicas útiles para la fertilidad pero no adecuadas debido a sus valores bajos, y características químicas en donde el P se encontró en alta cantidad, el N y el K escasearon en los suelos, el Ca y Mg se encontraron restringidos para los cultivos debido al pH ligeramente ácido, el Fe estuvo limitado, el Mn fue adecuado y el Zn y B fueron deficientes. La región de Tochimilco mostró características físicas no lo suficientemente buenas para describir un suelo fértil pero útiles para la producción de cultivos, y propiedades químicas donde el N y el K fueron deficientes, el P se encontró en gran proporción, el Ca y el Mg fueron menores a lo requerido por los cultivos influenciados por un pH moderadamente ácido, el Fe y Mn se obtuvieron en cantidades adecuadas y el Zn y B en cantidades muy reducidas. En ambas regiones los resultados describieron una baja fertilidad en los suelos.

## ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>2</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>4</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>7</b>
<b>Objetivo general</b>	<b>7</b>
<b>Objetivos específicos</b>	<b>7</b>
<b>HIPÓTESIS</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>8</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
1.1. ANTECEDENTES	8
1.2. SUELO	11
1.2.1. Suelos agrícolas	12
1.2.2. Degradación de los suelos	13
1.2.2.1. Erosión	16
1.2.2.2. Intensificación de la producción	20
1.3. FERTILIDAD EN SUELOS	22
1.3.1. pH	24
1.3.2. Densidad	25
1.3.2.1. Densidad aparente	26
1.3.2.2. Densidad real	27
1.3.2.3. Porosidad	27
1.3.3. Contenido y retención de humedad	28
1.3.4. Materia orgánica	29
1.3.5. Textura	31
1.3.6. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	33
1.3.7. Nutrientes	34
1.3.7.1. Macronutrientes	36
1.3.7.1.1. Nitrógeno (N)	36
1.3.7.1.2. Fósforo (P)	37

1.3.7.1.3. Potasio (K)	38
1.3.7.1.4. Calcio (Ca)	40
1.3.7.1.5. Magnesio (Mg)	41
1.3.7.1.6. Azufre (S)	42
1.3.7.2. Micronutrientes	43
1.3.7.2.1. Hierro (Fe)	43
1.3.7.2.2. Manganeso (Mn)	44
1.3.7.2.3. Zinc (Zn)	45
1.3.7.2.4. Cobre (Cu)	46
1.3.7.2.5. Molibdeno (Mo)	47
1.3.7.2.6. Boro (B)	48
1.3.7.3 Metales pesados	49
1.3.7.3.1. Plomo (Pb)	50
1.3.7.3.2. Cadmio (Cd)	51
1.3.7.3.3. Níquel (Ni)	52
1.4. CONDICIONES GEOGRÁFICAS Y CLIMATOLÓGICAS DEL ESTADO DE PUEBLA	54
1.5. LA AGRICULTURA	55
1.5.1. Agricultura en Puebla	56
1.5.2. El maíz	58
1.5.2.1. Maíz orgánico	59
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>60</b>
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>60</b>
2.1. ZONA DE ESTUDIO	60
2.2. MUESTREO	61
2.3. PARÁMETROS DETERMINADOS	65
2.3.1. Preparación de la muestra (AS-01)	66
2.3.2. pH medido en agua (AS-02)	67
2.3.3. Densidad aparente	67
2.3.4. Densidad real (AS-04)	68
2.3.5. Contenido de humedad en suelo (AS-05)	68

2.3.6. Contenido de materia orgánica (AS-07) -----	69
2.3.7. Nitrógeno total-----	70
2.3.8. Determinación de la textura del suelo por el método de bouyoucos (AS-09) -----	71
2.3.9. Fósforo extraíble (AS-11) -----	71
2.3.10. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico total-----	72
2.3.11 Determinación de cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K). -----	73
2.3.12 Determinación de micronutrientes y metales contaminantes (AS-14) -----	74
2.3.13 Determinación del contenido de boro (AS-15) -----	75
<b>CAPÍTULO III -----</b>	<b>76</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----</b>	<b>76</b>
3.1 RESULTADOS POR PARÁMETRO DETERMINADO -----	76
3.1.1. Resultados de pH -----	76
3.1.2. Resultados de densidad aparente (D.A) -----	77
3.1.3. Resultados de densidad real (D.R) -----	78
3.1.4. Resultados de porosidad -----	79
3.1.5. Resultados del contenido de humedad (%H) -----	80
3.1.6. Resultados de materia orgánica (% M.O)-----	81
3.1.7. Resultados de nitrógeno total (% N.T) -----	83
3.1.8. Resultados clasificación textural (% arena - % arcilla - % limo)-----	84
3.1.9. Resultados de fósforo extraíble-----	85
3.1.10. Resultados capacidad de intercambio catiónico total (CICT)-----	86
3.1.11. Resultados de cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K) -----	87
3.1.12. Resultados de boro (B)-----	89
3.1.13. Micronutrientes (Fe, Mn, Zn) y metales pesados (Cd, Ni)-----	90
3.2. RESULTADOS POR REGIONES -----	92
<b>CONCLUSIONES -----</b>	<b>96</b>
RECOMENDACIONES -----	97
<b>BIBLIOGRAFÍA -----</b>	<b>100</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Procesos de degradación del suelo agrupados según diversos autores .....	14
Cuadro 2. Textura y tamaño de partículas del suelo .....	32
Cuadro 3. Clasificación de elementos nutritivos del suelo .....	35
Cuadro 4. Superficie total sembrada en las localidades estudiadas .....	56
Cuadro 5. Superficie sembrada de maíz en las localidades estudiadas .....	56
Cuadro 6. Superficie cosechada en las localidades estudiadas .....	57
Cuadro 7. Volumen de la producción de grano de maíz en las localidades estudiadas .....	57
Cuadro 8. Requerimientos nutricionales del maíz .....	58
Cuadro 9. Ubicación geográfica de parcelas en las regiones de Acatzingo y Tochimilco....	61
Cuadro 10. Determinaciones físicas y químicas para evaluar la fertilidad de los suelos de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 .....	65
Cuadro 11. Longitud de onda de metales pesados Cu, Ni, Mn, Zn, Fe, Cd, Cr .....	74
Cuadro 12. Resultados pH .....	77
Cuadro 13. Resultados D.A.....	78
Cuadro 14. Resultados D.R. ....	79
Cuadro 15. Resultados de porosidad .....	80
Cuadro 16. Resultados %H .....	81
Cuadro 17. Resultados %M.O.....	82
Cuadro 18. Resultados %N.T.....	83
Cuadro 19. Resultados Clase Textural.....	84
Cuadro 20. Resultados Fósforo Extraíble.....	85
Cuadro 21. Resultados de CICT .....	86
Cuadro 22. Resultados de Cationes Intercambiables.....	87
Cuadro 23. Resultados de Boro .....	90
Cuadro 24. Resultados micronutrientes y metales pesados.....	91
Cuadro 25. Resultados físicos de la región de Acatzingo .....	93
Cuadro 26. Resultados químicos de la región de Acatzingo .....	93
Cuadro 27. Resultados físicos de la región de Tochimilco .....	94
Cuadro 28. Resultados químicos de la región de Tochimilco .....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estaciones de muestreo de la región de Acatzingo .....	62
Figura 2. Estación 1, San Sebastián Teteles.....	63
Figura 3. Estación 2, San Sebastián Teteles.....	63
Figura 4. Estación 6, Aljojuca .....	63
Figura 5. Estación 7, San Juan Atenco .....	63
Figura 6. Estación 9, Soltepec.....	63
Figura 7. Estaciones de muestreo de la región de Tochimilco .....	64
Figura 8. Estación 3, Huilango .....	64
Figura 9. Estación 4, Huilango .....	64
Figura 10. Estación 5, Huilango .....	65
Figura 11. Estación 8, Huilango .....	65
Figura 12. Comparación de los resultados de pH de las nueve estaciones determinadas .....	77
Figura 13. Comparación de los resultados de la densidad aparente de las nueve estaciones determinadas .....	78
Figura 14. Comparación de los resultados de la densidad real de las nueve estaciones determinadas .....	79
Figura 15. Comparación de los resultados de porosidad de las nueve estaciones determinadas .....	80
Figura 16. Comparación de los resultados del contenido de humedad de las nueve estaciones determinadas .....	81
Figura 17. Comparación de los resultados del contenido de materia orgánica de las nueve estaciones determinadas.....	82
Figura 18. Comparación de los resultados de nitrógeno total de las nueve estaciones determinadas .....	83
Figura 19. Comparación de los resultados de fósforo extraíble de las nueve estaciones determinadas .....	85
Figura 20. Comparación de los resultados de CICT de las nueve estaciones determinadas .....	86

Figura 21. Comparación de los resultados de Ca y Mg intercambiables de las nueve estaciones determinadas .....	88
Figura 22. Comparación de los resultados de Na y K intercambiables de las nueve estaciones determinadas .....	88
Figura 23. Comparación de los resultados de boro de las nueve estaciones determinadas .....	90

## **INTRODUCCIÓN**

El siguiente documento muestra la investigación realizada para determinar la fertilidad de suelos de cultivo en base a la NOM-021-SEMARNAT-2000, de dos regiones donde se practica la agricultura como actividad económica primaria dentro del Estado de Puebla y donde el principal cultivo es el maíz criollo. Los municipios de Acatzingo y Tochimilco conforman estas regiones de producción agrícola, a las que se le suman otros municipios, juntas auxiliares y localidades con diferentes límites políticos, por lo que en este trabajo se toman en cuenta Acatzingo y Tochimilco como regiones productivas y no tanto como delimitaciones políticas.

En el Capítulo I se muestra el marco teórico donde se incluyen los antecedentes, que sirven para situar a las zonas estudiadas en un contexto socioeconómico que ayude a dar idea del motivo por el cual los agricultores requieren un estudio de este tipo, sobre todo de la región de Acatzingo que se utiliza como punto de comparación para la región de Tochimilco que busca producir maíz orgánico. También se incluye la definición de suelo visto desde varias áreas en las que se involucra, las causas de su degradación, las características físicas y químicas que hacen a un suelo considerarlo como fértil o infértil, las condiciones geográficas y climatológicas del Estado y de las regiones, información general acerca de la agricultura tanto en el país, como en el Estado y propiedades del maíz que lo hacen adquirir gran relevancia e importancia como producto agrícola.

En el Capítulo II se exponen las metodologías de la NOM-021-SEMARNAT-2000 que se utilizaron para el muestreo y la evaluación de la fertilidad en suelos. Algunas de las metodologías implementadas fueron las del manual de Análisis Físico- Químicos de Suelos de la M.C. Irma Domínguez y del M.C. Nicolás Aguilera (1984), debido a la falta de reactivos y de equipo con el que se pudieran realizar las determinaciones como se efectúan en la norma.

En el Capítulo III se presentan los resultados obtenidos del análisis de fertilidad por cada una de las determinaciones realizadas, su posterior interpretación por

medio de manuales y una discusión de las mismas, al igual que una comparación entre regiones de acuerdo a sus resultados e interpretaciones de fertilidad.

Por último, en el Capítulo IV se dan a conocer las conclusiones a las que se llegaron en esta investigación y las recomendaciones que se harán a los agricultores de las zonas estudiadas de acuerdo a lo concluido en la valoración de la fertilidad de los suelos.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Uno de los usos principales de los suelos es la agricultura, pero debido al aumento poblacional la demanda de alimentos ha crecido de igual manera, generando una gran explotación de los suelos agrícolas. Esto por su parte afecta el estado de los suelos lo cual se refleja en la baja productividad de los cultivos.

Otros factores que pueden afectar el crecimiento de las plantas cultivables son los climatológicos, biológicos y edafológicos. Cada uno de estos factores puede influir en el cultivo de forma positiva o negativa dependiendo de ellos las condiciones que se obtengan (Bear , 1958). Es importante tener presentes todos estos factores para poder tener un mejor manejo de las técnicas agrícolas dependiendo del cultivo que se desee cosechar.

México cuenta con un territorio Nacional de 198 millones de hectáreas de las cuales 145 millones se dedican a la actividad agropecuaria. Cerca de 30 millones de hectáreas son tierras de cultivo y 115 millones son de agostadero (SAGARPA, 2007).

La producción agrícola en México ha decrecido considerablemente, tan solo en el cultivo del maíz (INEGI, 2013) menciona que la superficie agrícola cosechada en 2001 fue de 7811 miles de hectáreas y para el 2011 este número se redujo a 6069 miles de hectáreas. Esto representa un problema para nuestro país y para los agricultores, ya que el maíz es un alimento muy demandado por formar parte de la dieta común de los mexicanos y para la agricultura porque es una de las principales actividades económicas.

El Estado de Puebla desde sus inicios se ha dedicado a la actividad agrícola, debido a que la mayoría de su territorio presenta un suelo favorable para cultivar. Esto ha ido cambiando con el paso del tiempo, ahora el suelo ya no genera la misma producción por haber perdido las características necesarias para el crecimiento de los cultivos. Es por esto que se buscan nuevas tecnologías para la recuperación de los suelos.

Algunos de los municipios que han presentado baja productividad agrícola por las causas antes mencionadas y otras más son los municipios de Acatzingo y de Tochimilco, específicamente en la junta auxiliar de San Francisco Huilango.

En el municipio de Acatzingo, la mayor parte del territorio está dedicado a la actividad agrícola; grandes extensiones donde se practica la agricultura de temporal se extiende al centro y norte; al sur la agricultura es de riego formando parte de la extensa zona de regadío del Valle de Tepeaca. La principal actividad agrícola que se practica en la región es la producción del maíz criollo azul y rojo, que las familias campesinas utilizan principalmente para abastecer sus necesidades y ayudarse en su economía (e-local, 2011).

En la junta auxiliar de San Francisco Huilango del municipio de Tochimilco, su sector primario económico es la agricultura, la explotación forestal, la ganadería y la minería (Foro-México, 2005), pero su actividad preponderante es la agropecuaria, siendo los principales cultivos el maíz y el frijol (e-local, 2011).

Actualmente el cultivo de maíz en estas dos regiones se ha visto afectado por el deterioro del suelo, lo cual perjudica la economía de los agricultores y el autoconsumo que les proporcionan las cosechas, recordando que la agricultura es la actividad económica principal en estos lugares y que su éxito depende del crecimiento de los cultivos. Tisdale y Nelson (1970) nos dicen que si las plantas crecen y los rendimientos de las cosechas son buenos, el agricultor ha obtenido el éxito y, excluyendo una gestión económica mal llevada, recibirá a cambio de sus inversiones de trabajo y capital la calidad y cantidad de la cosecha. Por otro lado,

si el crecimiento de la planta ha sido pobre y los rendimientos de la cosecha son bajos, el agricultor recibirá una pobre recompensa, si es que recibe algo.

Es por esto que teniendo una escasa producción, un cultivo más pequeño que en temporadas anteriores y al no contar con los recursos necesarios para evaluar la problemática, los mismos agricultores se dieron a la tarea de buscar instituciones que contribuyeran con el estudio de los suelos de cultivo para conocer los motivos de su situación y así encontrar una posible solución.

## **JUSTIFICACIÓN**

Para los antiguos mexicanos, el maíz representó la principal fuente de alimentación y el más rico alimento dentro de su dieta diaria, ya que ofrecía e incluso hoy día, una serie de ventajas: abundante rendimiento, resistencia a las largas temporadas de almacenamiento y principalmente, adaptabilidad a casi todos los suelos y climas (Vázquez, Gómez y Lugo, 2004).

Esta planta de la familia de las gramíneas es rica en hidratos de carbono, proteínas, fibra, grasas, betacarotenos y vitaminas del grupo B (B1, B3 y B9) nutrimentos que, en conjunto, lo convierten en un alimento que aporta energía, que favorece la digestión y que tiene propiedades antioxidantes (FAO, 1993).

Martínez, (2010) menciona que a nivel mundial el maíz es el tercer cereal de mayor importancia en la nutrición humana, de acuerdo con la Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, y que actualmente junto con el trigo constituye la fuente del 40% de los alimentos del mundo y cerca del 25% de las calorías que se consumen en los países en desarrollo. También dice que en México existen 22000 diferentes tipos de grano, de los cuales, 21200 son registros sistemáticos de diversas razas de maíz criollo de acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

El maíz de México ha llegado a constituir uno de los tres principales alimentos en el mundo, junto con el trigo del Mediterráneo y el arroz de China (Vázquez *et al.*,

2004), siendo su comercialización una base importante en la economía del país. Se considera en este trabajo al maíz, trigo y arroz como los granos básicos de importancia mundial.

Del Valle y Solleiro, (1996) opinan que, desafortunadamente por los profundos cambios que están ocurriendo en el contexto económico internacional, acompañados de los programas de ajuste y de la reestructuración de la política económica en el plano nacional, imponen a México la necesidad de transformar sus estrategias y enfoques para lograr la competitividad que le permita participar en los mercados globales.

También dicen que la agricultura en México es un sector sumergido en una crisis estructural que comenzó desde mediados de la década de los sesenta y se profundizó cuando la producción de granos básicos disminuyó su dinamismo, iniciándose la pérdida de la autosuficiencia alimentaria.

Las regiones de Acatzingo y Tochimilco, pertenecientes al Estado de Puebla, se han visto afectadas por esta crisis teniendo bajos rendimientos agrícolas promedio, los cuales no les permiten un autosustento alimentario y económico.

Los agricultores han tenido que explotar sus suelos con el fin de obtener algunas ganancias, lo cual ha ocasionado el consumo de los nutrientes que el suelo les aporta a las cosechas, causando un deterioro del mismo, por lo que han tenido que buscar de alguna manera producir más maíz sin poder alcanzar un buen resultado.

Se han basado en conocimientos empíricos, que si bien muchas veces funcionan, en este caso necesitan de un conocimiento científico. Por esta razón, un análisis de fertilidad de sus suelos puede ayudar a encontrar y solucionar su problema.

En suelos fértiles la vegetación nace y se desarrolla abundantemente, son ricos en humus y en sales minerales. Generalmente son los suelos húmedos. Estas características los hacen útiles para la agricultura.

La fertilidad de un suelo de cultivo se puede mejorar añadiéndole sustancias que faciliten el crecimiento de los vegetales. Por este motivo en esta investigación se realizó un estudio de la fertilidad de nueve parcelas de cultivo, con el cual se conocieron las concentraciones de los macro y micronutrientes que contienen estos suelos de las regiones de Acatzingo y de Tochimilco, efectuando los análisis físicos y químicos de suelos necesarios que indica la Norma Oficial Mexicana vigente NOM-021-SEMARNAT-2000, respecto a la fertilidad. Contribuyendo así a la mejora de la producción de maíz en estas regiones, a su economía y promoviendo cultivos de maíz de buena calidad para la dieta diaria de la población que lo consuma.

Los municipios de Acatzingo y Tochimilco conforman regiones de producción agrícola, a las que se le suman otros municipios, juntas auxiliares y localidades con diferentes límites políticos. En esta investigación se toman en cuenta Acatzingo y Tochimilco como regiones productivas, y no tanto como delimitaciones políticas. Cabe mencionar que esta investigación está enmarcada en el proyecto acerca de la posibilidad de la certificación orgánica de algunas variedades de maíz criollo en Tochimilco, por lo que este cultivo es el tema central para evaluar la fertilidad de los suelos. La región de Acatzingo, Puebla fue seleccionada para tener puntos de comparación por sus diferentes características edafoclimáticas.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Determinar las características físicas y químicas de nueve parcelas de cultivo en las regiones de Acatzingo y Tochimilco para determinar su fertilidad, implementando las metodologías de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis.

### **Objetivos específicos**

- Implementar las metodologías que refieren a la fertilidad de los suelos como son: pH, densidad aparente, densidad real, contenido de humedad, materia orgánica, clase textural, nitrógeno total, fósforo extraíble, capacidad de intercambio catiónico, contenido de micronutrientes disponibles y metales pesados.
- Con los resultados obtenidos determinar la fertilidad del suelo de cada parcela, a través de manuales de interpretación.
- Proponer alternativas para mejorar la fertilidad de los suelos.

## **HIPÓTESIS**

- El suelo de la región de Acatzingo tiene baja fertilidad debido a la intensificación de la producción agrícola, mediante el cultivo intensivo de algunas hortalizas y de nopal.
- El suelo de la región de Tochimilco tiene baja fertilidad debido a la erosión eólica e hídrica por los escurrimientos.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. ANTECEDENTES

La fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos es un tema que ha adquirido importancia en la actualidad debido al constante aumento en la demanda de alimentos y a la extracción excesiva de nutrientes de los suelos, generando cultivos en menor calidad y cantidad. Es por esto que desde hace algunos años, profesionistas en el área se han dado a la tarea de realizar investigaciones sobre el tema o relacionados con el mismo, con el fin de obtener el conocimiento que ayude a resolver esta problemática.

Existen trabajos realizados dentro del Estado de Puebla que han servido para resolver situaciones de la misma índole que en la presente investigación.

Fuentes, (1993) en su tesis titulada “Diagnóstico de la fertilidad del suelo y niveles nutrimentales del cultivo de maíz en el Estado de Puebla”, presentó como objetivo principal la evaluación de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental del cultivo de maíz en las principales zonas productoras del estado de Puebla, las cuales están conformadas por Zacatlán, Libres, Cholula, Izúcar de Matamoros y Tecamachalco, obteniendo como conclusiones un pH alcalino, valores de medianos a medianamente ricos en porcentaje de materia orgánica, bajas concentraciones de nitrógeno, medianas concentraciones de fósforo, muy altas concentraciones de potasio, calcio y magnesio, niveles suficientes de manganeso y cobre dentro de la planta y bajas concentraciones de zinc dentro de la planta.

Simón, (1991) realizó su tesis con el nombre “Dinámica macronutricional (N, P, K, Ca, Mg y S) del suelo durante el desarrollo del cultivo de maíz en la región de Teziutlan, Sierra Norte del Estado de Puebla” con el objetivo de evaluar la fertilidad de los suelos bajo la explotación del cultivo de maíz para dar un diagnóstico preliminar de la respuesta de los cultivos al efecto de la fertilización, concluyendo que los suelos estudiados presentaron niveles macronutrientales

bajos y demostrando que para el caso de los contenidos de fósforo, potasio, calcio y sulfatos no se obtuvieron cambios durante los muestreos.

Para complementar el estudio anterior, Flores, (1995) en su tesis llamada “Dinámica micronutricional temporal del suelo (Fe, Zn y Mn) durante un ciclo vegetativo del cultivo de maíz en la región de Teziutlán, Puebla”, mostró como objetivo la evaluación de la fertilidad en diferentes etapas del ciclo agrícola y la cuantificación de la variación en los contenidos micronutrientales (Fe, Zn y Mn) con el propósito de estimar la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización micronutricional, obteniendo como resultados contenidos de hierro y zinc sin variaciones significativas a través del tiempo, a diferencia del manganeso que si presentó variaciones.

En el caso de esta investigación, las zonas de estudio cuentan con trabajos anteriores que abren un panorama general de la situación en la que se encuentran. Los tópicos de los que generalmente hablan son acerca de las especies cultivadas, su producción y su aporte en la economía de la localidad, así como de algunos incidentes medioambientales tanto de origen natural como antropogénico.

Lugo-Morin, (2013) en su investigación titulada “Supermercados, estrategias y pequeños productores hortícolas en el municipio de Acatzingo: el caso Walmart”, habla acerca de las estrategias de comercialización de Walmart y las oportunidades de desarrollo de los pequeños productores en el municipio de Acatzingo, Puebla, donde concluye que la manipulación de los precios de las hortalizas (negociaciones directas que establece Walmart con los pequeños productores) son estrategias que apuntan hacia la hegemonía de esta cadena de autoservicio en el sistema hortícola, obteniendo los productores una paga injusta por sus productos y suelos explotados por los tiempos cortos de recuperación que se les da debido a la rotación de cultivos.

Rivera, (2011), menciona en su trabajo “Situación socio económica y ambiental de los productores de Acatzingo, Puebla por el derrame de hidrocarburo en suelos

agrícolas”, que de los 159 productores que se encuestaron 8 años después de la fuga del combustible, el 46.3% de los afectados opinó que los suelos aún están contaminados pero un 74% de los no afectados consideró que los suelos no están contaminados. La totalidad de los productores afectados opinó que la contaminación de los suelos ocasionó una disminución de su producción y de sus ingresos, afectando sus condiciones de vida. Como consecuencia del derrame se desencadenaron procesos productivos irregulares, impactos en la salud, economía y en la organización familiar. En el año 2002 y 2010 el 91.1% de los productores respondieron que hubieron efectos negativos sobre los árboles y animales de la zona, muchos de ellos se perdieron, así mismo en la salud humana, un 90% en ambos años planteó que padecieron enfermedades atribuibles al derrame generado en sus suelos de cultivo. Con respecto a la indemnización económica, los campesinos afirmaron que el dinero pagado no sustituyó los beneficios que la tierra le dejaría en 8 años que ha durado el problema por el siniestro.

Ramírez, Ramírez y Juárez, (1995), realizaron un estudio longitudinal en once municipios al oriente del estado de Puebla para sacar una estadística de la competitividad del campesino mexicano en la producción de maíz. Dentro de estos once municipios se encuentran Aljojuca, San Juan Atenco y Soltepec, los cuales forman parte de la región de Acatzingo. Las conclusiones fueron que la zona formada por los once municipios tiene un buen nivel productivo para el cultivo de maíz y al ser definida la competitividad como la capacidad de producir la tonelada de maíz a un costo de producción inferior a una cantidad establecida con base en el precio internacional de maíz del período 1989-1995, se encontró como productores competitivos a la mayoría de los municipios, entre los cuales destacaron los 3 municipios antes mencionados.

Sobre Huilango, Tochimilco, no se encontraron estudios pertinentes a la presente investigación.

## 1.2. SUELO

Una delgada capa de suelo cubre la mayor parte de la superficie terrestre. Esta capa, cuyo espesor varía entre unos pocos centímetros y 2 o 3 metros, puede parecer insignificante comparada con la masa de nuestro planeta. Sin embargo, en esos pocos centímetros, los reinos vegetal y animal se encuentran con el mundo mineral y establecen con él una relación dinámica (Thompson y Troeh, 1998).

El suelo proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que se asientan sobre él (Arias, 2001).

El suelo está constituido por tres fases interrelacionadas, la fase sólida, la fase líquida y la fase gaseosa. Estas están en constante evolución y el hombre interfiere en esa evolución alterando el equilibrio, ya sea por acciones agroforestales, por contaminación o por ocupación.

Los usos del suelo son muy variados, dependen de su grado de desarrollo y de sus características. Los principales usos de los suelos según Seoáñez, (1999) son: suelos forestales, pastizales, suelos improductivos y suelos agrícolas

El origen de la palabra suelo proviene del latín *solum*, que significa base o fondo. El término suelo ha sido definido de diferentes maneras, ya sea que dicha definición provenga del geólogo, del agrónomo, del ingeniero civil o de cualquier otro especialista que esté ligado directamente con él.

Seoáñez, (1999) define al suelo de manera general como, la superficie emergida de la tierra o la parte de la litósfera que de alguna forma está sometida a la acción de los agentes climáticos y biológicos y por supuesto, a una intervención masiva de las actividades humanas.

El geólogo define al suelo como el material resultante de la descomposición y desintegración de la roca por el ataque de agentes atmosféricos (Chiossi, 1975 citado por Crespo, 2004). El agrónomo, según Tschobotarioff (1979) citado por Crespo (2004), define al suelo como la delgada parte superior del manto de rocas

en que penetran las raíces de las plantas y de donde éstas toman el agua y las demás sustancias para su existencia. Algunos ingenieros civiles (Rico y Del Castillo, 2001 citado por Crespo, 2004) definen al suelo como el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o la descomposición química de rocas preexistentes.

Todas estas definiciones tienen puntos en común, pero para esta investigación interesa más la definición que da el edafólogo, el cual considerando el suelo como medio de cultivo, lo define como una mezcla de materiales minerales y orgánicos capaz de soportar la vida vegetal (Thompson y Troeh, 1998).

Existen muchos factores que afectan el desarrollo vegetativo de una planta, factores internos ligados al organismo vegetal o factores ligados al ambiente, donde las condiciones agroecológicas incluyen como parámetros al suelo y al clima.

#### 1.2.1. Suelos agrícolas

Cuando hablamos de suelo agrícola estamos hablando de un tipo especial de suelo que debe contar con ciertos elementos que lo conviertan en suelo apto para el crecimiento de los cultivos. Además de ser un suelo fértil, con una importante composición de humus (la sección orgánica del suelo), el suelo agrícola debe contar con nutrientes principales tales como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, magnesio, calcio, sodio y otros como el hierro, cobre y manganeso aunque estos últimos en menor proporción.

Otros elementos que también deben ser controlados para considerar a un suelo como un suelo apto para la agricultura son por ejemplo el pH del suelo, su textura y su conductividad eléctrica. Estos tres en los parámetros normales contribuirán a que aquellos cultivos crezcan más efectivamente y sean de mejor calidad, pudiendo ser consumidos por el ser humano sin ningún tipo de problema y convirtiéndose en productos de alta duración y resistencia a las posibles inclemencias del tiempo o de otros factores externos.

Estos suelos se ven sometidos a una actividad física y biológica artificial, ya que son alterados continuamente por las labores humanas. Estas actividades modifican continuamente las características del suelo, todo con el fin de obtener el beneficio de sus frutos.

A pesar de que las actividades que se realizan en un suelo de cultivo son principalmente para tener mejores beneficios de este, muchas veces al exceder estas actividades se provoca un daño al propio suelo, teniendo serias consecuencias, desde pérdida de fertilidad, cambios en el pH del suelo, contaminación por metales pesados a causa de los fertilizantes, excesos de salinidad, entre otros. Todo esto puede no solo causar daños al suelo, sino también afectar al cultivo que se esté produciendo en ese suelo.

#### 1.2.2. Degradación de los suelos

Se entiende por degradación de un suelo agrícola cualquier pérdida de las propiedades de éste, necesarias para el buen desarrollo y rendimiento de cultivos. Los procesos de degradación son los mecanismos responsables de la disminución de la calidad del suelo. Son múltiples los mecanismos implicados y frecuentemente interactuantes lo que ha llevado a establecer diferentes agrupaciones como se muestra en el Cuadro 1. Normalmente se ha separado en procesos de degradación física, química y biológica atendiendo a la naturaleza de las propiedades del suelo afectadas. Sin embargo, esta distinción resulta un tanto arbitraria poco satisfactoria, puesto que, muy frecuentemente, se producen de manera simultánea. El suelo constituye un sistema dinámico y complejo en el que los diferentes componentes interactúan entre sí, de forma que las alteraciones que se produzcan en uno de ellos van a provocar cambios en el resto. Así, la disminución en el contenido de materia orgánica conlleva a la pérdida de nutrientes y el deterioro de la fertilidad del suelo, a la vez que provoca importantes cambios en las propiedades físicas, dado el papel que juega en la formación y estabilización de los agregados, que pueden acentuar los procesos erosivos. De la

misma forma, el proceso de alcalinización va acompañado de fuertes cambios en las propiedades físicas y químicas del suelo, alterando drásticamente la actividad microbiana (Olalla, 2000).

<b>Cuadro 1. Procesos de degradación del suelo agrupados según diversos autores</b>		
<b>Fuente</b>	<b>Tipos</b>	<b>Procesos</b>
(FAO/PNUMA, 1980)	1. Erosión hídrica 2. Erosión eólica 3. Exceso de sales 4. Degradación química 5. Degradación física 6. Degradación biológica	-Salinización y sodificación -Lixiviación de bases y acumulación de elementos tóxicos (p.e. metales pesados) -Apelmazamiento, encostramiento, reducción de la permeabilidad, compactación, falta de aireación, degradación de la estructura y limitaciones a la radiación -Pérdida de materia orgánica
Yassoglou, (1987)	1. Pérdida de volumen 2. Degradación de la estructura 3. Pérdida de materia orgánica y disminución de la actividad biológica 4. Degradación	-Erosión, compactación y encharcamiento -Erosión, rotura mecánica, alcalinización, encharcamiento, pérdida de materia orgánica, impacto de las gotas de lluvia y sedimentación -Erosión, manejo exhaustivo y excesivo drenaje -Lavado de bases, acidificación,

	<p>química</p> <p>5. Deterioro de la fertilidad</p>	<p>salinización, alcalinización, carbonatación, contaminación química, fertilización inadecuada, erosión y sedimentación</p> <p>-Erosión, lavado de bases, fijación, volatilización y manejo exhaustivo</p>
Lal <i>et al.</i> , (1990)	<p>1. Degradación física</p> <p>2. Degradación química</p> <p>3. Degradación biológica</p>	<p>-Compactación, laterización, erosión y desertificación</p> <p>-Reducción de la fertilidad, acidificación, sodificación y acumulación de compuestos tóxicos</p> <p>-Disminución de la materia orgánica y reducción de la macro y micro fauna del suelo.</p>
UNEP (1992)	<p>1. Por desplazamiento del material</p> <p>2. Deterioro interno del suelo</p> <p>2. a Por procesos físicos</p> <p>2. b Por procesos químicos</p>	<p>-Erosión hídrica y eólica</p> <p>-Compactación, sellamiento artificial, encostramiento superficial, sodificación, encharcamiento, aridificación y subsidencia de suelos agrícolas</p> <p>-Salinización, pérdida de nutrientes, pérdida de materia orgánica, acidificación y contaminación</p>

Fuente: Olalla Mañas, 2000.

Procesos como la erosión, salinización, lixiviación, acidificación, etc., son procesos que de forma natural se están produciendo, sin que requieran la intervención humana. Sin embargo, consideramos que estos mismos procesos causan degradación cuando han sido acelerados o inducidos por la acción humana.

La agricultura es sin duda alguna la actividad humana que mayor incidencia ha tenido sobre los suelos. Cuenta a su favor el largo periodo de tiempo desde que se viene desarrollando en la gran extensión del territorio que ocupa. Sin embargo, el mayor impacto tanto el suelo como sobre el medio ambiente, se ha producido a partir de la segunda mitad de este siglo con la intensificación de las prácticas y el desarrollo tecnológico. Si no se controlan las influencias naturales negativas y si no se realizan prácticas agrícolas adecuadas, los suelos se degradan.

La aplicación de fertilizantes y plaguicidas ha introducido nuevos problemas, algunos conocidos, como la contaminación de aguas de consumo humano por nitratos, otros desconocidos como los efectos que pueden tener los más de mil principios activos en los plaguicidas. La acumulación de metales pesados en el suelo representa una seria amenaza, que de no tomarse en consideración será una realidad a medio plazo.

Como resultado de la desaparición de la estructura y fertilidad del suelo, la capacidad para mantener el crecimiento y producción de los cultivos baja progresivamente. Al final tales suelos llegan a ser inadecuados para la agricultura.

#### 1.2.2.1. Erosión

La erosión del suelo es el arrastre de parte de la superficie terrestre, nos menciona Graetz, (1992). Las lluvias fuertes y el viento son los dos principales agentes responsables de este proceso.

La erosión de los suelos según Almorox, López y Rafaelli, (2010), se entiende como la remoción y pérdida del suelo por la acción del agua y del viento, con disminución de componentes minerales y orgánicos más finos provocada por la acción del hombre.

Está tiene desde el punto de vista de las Ciencias de la Tierra, un aspecto positivo al llevar a los ríos sedimentos y nutrientes, manteniendo de esta forma el necesario equilibrio sedimentario en los cauces y en las playas, a la vez que configura y mantiene espacios muy fértiles como son las llanuras aluviales y los deltas. No obstante, ciertas actividades humanas pueden agravar y acelerar en gran medida la erosión. Las tasas de erosión geológica son sostenibles, pero las tasas de la erosión acelerada no permiten su regeneración.

La erosión está originada por la combinación de varios factores, tales como las pendientes pronunciadas, el clima, las características del suelo, su uso y gestión, el tipo y estado de cubierta vegetal. Este proceso se acelera cuando el ecosistema es perturbado por las actividades humanas como son la práctica de técnicas agrarias inadecuadas, cambios de uso del suelo, deforestación, etc.

La erosión del suelo se reduce a tres fases: desprendimiento, arranque, transporte y posterior sedimentación del material removido.

Las consecuencias de la erosión son la pérdida de la capacidad del suelo para realizar sus funciones y, en último término, su desaparición total o la de algunos de sus horizontes. Indirectamente, el fenómeno erosivo puede afectar negativamente a los cursos de agua ya que los nutrientes y agentes contaminantes arrastrados contaminan los ecosistemas fluviales.

La erosión hídrica constituye el principal proceso de degradación que afecta a los suelos y engloba tanto la degradación física del suelo como la química y la biológica (Olalla, 2000).

La erosión hídrica es aquella en la cual los procesos de remoción del suelo y transporte son efectuados por el agua (Almorox *et al.*, 2010).

Actúa de manera selectiva arrastrando las fracciones más finas del suelo (arcillas, materia orgánica y otras fracciones coloidales) provocando los siguientes daños y pérdidas:

- La pérdida de nutrientes

- El deterioro de la estructura
- La reducción de la profundidad efectiva del suelo
- Disminución de la capacidad de retención de agua por escurrimientos
- El suelo desnudo disminuye en fertilidad
- Las capas bajas no fértiles del suelo son arrastradas y depositadas sobre terrenos fértiles, afectando su productividad.

Todo ello lleva una disminución de la productividad del suelo que afecta negativamente el crecimiento y vigor de las plantas.

De acuerdo con Nuñez, (2001) dentro de la erosión hídrica, existen diferentes tipos: la erosión pluvial, la cual es consecuencia directa del impacto de las gotas de lluvia en el suelo sin cobertura vegetal; la erosión laminar que es el arrastre de partículas del suelo suspendidas en el agua de lluvia, que se desplaza en el sentido de la pendiente; la erosión en surcos, la cual se debe al escurrimiento o flujo concentrado del agua, incluso en terrenos ligeramente ondulados con 3 a 8% de pendiente; la erosión en cárcavas que es consecuencia de altas precipitaciones en terrenos bastante accidentados; y la erosión en terracetos. Tanto los surcos como las cárcavas seccionan los campos, dificultando las prácticas agrícolas.

Las típicas erosiones hídricas del medio agrícola son la laminar, en surcos y en cárcavas las cuales son provocadas por la acción del hombre.

La erosión originada por la lluvia es más grave que la causada por el viento, pero esto no significa que la erosión eólica sea menos importante en todas las partes, pues hay regiones en las que sus consecuencias son tan perjudiciales como la peor de las erosiones hídricas.

Almorox *et al.*, (2010) mencionan que la erosión eólica es el proceso de disgregación, remoción y transporte de las partículas por la acción del viento. El fenómeno de la erosión eólica se favorece con:

- Vientos fuertes y frecuentes
- Superficies llanas expuestas al viento

- Suelo seco, suelto, de textura fina y poca materia orgánica. Con una inexistente o degradada estructura del suelo
- Condiciones de aridez. Altas temperaturas y escasas precipitaciones
- Escasa cubierta vegetal. Así un pastoreo abusivo, la quema de residuos agrícolas y el laboreo irracional pueden ser factores causantes de la erosión eólica.

Los factores que afectan en general a la mayor o menor incidencia de la erosión eólica en el suelo son las condiciones edáficas, la precipitación y la vegetación (Hudson, 2006).

La erosión eólica ocurre después de periodos prolongados de sequía. De acuerdo con Graetz, (1992) el daño por erosión eólica ocurre en terrenos desprotegidos o solo parcialmente cubiertos por la vegetación. El sobrepastoreo es una de las principales causas de este tipo de daño al suelo agrícola. Un viento fuerte puede convertirse en una tolvanera, la que con el impacto y la fricción de las partículas en movimiento maltrata los cultivos.

El viento es un factor importante desde el punto de vista agroclimático, a él van ligados muchos aspectos agrometeorológicos para el estudio de la viabilidad de los cultivos. El viento es también responsable del desaporque de las plantas, como resultado de éste las raíces superficiales quedan desprotegidas, por lo que se debilita la planta.

La eliminación de la vegetación para la puesta en cultivo altera el equilibrio natural, dejando la superficie del suelo expuesta a los agentes erosivos e interrumpiendo el aporte de restos vegetales al suelo, a menos que se realicen prácticas de manejo como la aplicación de enmiendas orgánicas o de residuos de cosecha, con la puesta en cultivo, el suelo recibe menos aportes por parte de las plantas cultivadas a la vez que se produce una rápida mineralización del humus, favorecida por la acción del laboreo y por las altas temperaturas. Se inicia así un proceso de disminución progresivo del contenido de materia orgánica del suelo

que provoca un rápido deterioro de su fertilidad y estructura, con lo que se disminuye la infiltración y aumenta la escorrentía incentivándose los procesos erosivos.

Cuando un total moderado de precipitaciones anuales se concentra en una parte del año, el resto puede considerarse completamente seco y vulnerable a la erosión eólica. Esta situación da lugar a que en una misma región coexisten con igual intensidad la erosión hídrica y eólica.

#### 1.2.2.2. Intensificación de la producción

El objetivo principal que persigue al agricultor es la producción de suficientes alimentos y otros productos que le permitan hacer su sistema de explotación viable, por lo tanto una característica fundamental de los sistemas agrícolas es su productividad, la cual va ligada directamente con el crecimiento de la población mundial, mismo que en las últimas décadas ha sido posible gracias al incremento en la producción de alimentos. De hecho, a pesar de que la población mundial se ha duplicado en algo más de tres décadas, actualmente se produce un 24% más alimentos que en 1960 y los precios reales son un 40% menor que entonces. No obstante, aunque la población mundial actualmente se encuentra sobre los 7000 millones de personas, numerosos estudios indican que para el año 2025 se aproximará a los 7500-8000 millones, lo cual implica un desafío importante para los agrónomos en el futuro.

El aumento de la producción agraria en más del doble sin que aumente la superficie cultivada ha sido posible por la intensificación de la producción, nos mencionan Villalobos, Mateos, Orgaz y Fereres, (2009). Ésta, combinada con la mejora genética, el mayor uso de fertilizantes y fitosanitarios y otras técnicas de manejo sirven para elevar los rendimientos. Así los rendimientos potenciales y los reales han aumentado sensiblemente desde 1960, si bien aunque el incremento del rendimiento potencial ha sido relevante, la disminución de la brecha entre el rendimiento real y el potencial ha tenido mucha mayor influencia en la mejora de la

productividad agrícola, particularmente en aquellas zonas donde las condiciones de suelo y clima son favorables y hay acceso a capital (humano y económico) para optimizar el manejo del cultivo. La distancia entre rendimiento real y potencial ha disminuido hasta tal punto que las cosechas récord obtenidas por algunos agricultores en los últimos años están ya en niveles potenciales. Por el contrario, la distancia entre las cosechas reales y potenciales en zonas menos favorecidas para la producción agrícola (física y socialmente), continúan siendo un problema muy importante.

Por otra parte Raeburn, (1987), nos dice que la intensificación de la producción en los suelos de cultivo genera un desgaste excesivo de macros y micronutrientes esenciales para las plantas. El suelo no se puede regenerar de manera autónoma y esto origina que el rendimiento que éste tenía anteriormente no sea el mismo con el paso del tiempo y tomando en cuenta que la contribución fundamental de la agricultura son los alimentos, el hombre depende de la agricultura para casi todo el suministro. La caza y la pesca aportan, en comparación, pequeñas cantidades y la contribución de la síntesis artificial es aún más pequeña.

Como podemos ver, estos autores tienen puntos de vista diferentes pero sustentados en situaciones desiguales, ya que para Villalobos, y demás autores la intensificación de la producción genera rendimientos al contar con el capital necesario para recurrir a soluciones alternas que remuevan la degradación existente en el suelo y de esta manera producir más rápido y en mayor cantidad. En cambio Raeburn, expresa su opinión en un sistema agrario donde no se cuentan con recursos para invertir en la regeneración del suelo dañado, situación que observamos mucho en zonas donde la producción mayormente es para autoconsumo.

Existen estudios teóricos de la capacidad del planeta para producir alimentos que indican que el potencial máximo es bastante más alto que el que requiere la población actual y la futura. Suponiendo que se pudiesen roturar todas las tierras

cultivables y la brecha entre rendimientos reales y potenciales desapareciera, se podrían alimentar casi 100000 millones de personas, más que diez veces la población esperada para el año 2050 (Villalobos *et. al*, 2009). No obstante, estas estimaciones teóricas son difícilmente alcanzables por la dificultad económica con las que cuentan, por otra parte los aumentos en la productividad de las últimas décadas han dejado regiones agrícolas que son con frecuencia poco productivas, frágiles y están sometidas a una degradación de sus recursos, por lo que no resulta fácil aumentar su productividad actual en las condiciones socio-económicas y culturales en las que se encuentran.

### 1.3. FERTILIDAD EN SUELOS

Fertilidad es el potencial que tiene un suelo para suplir los elementos nutritivos en las formas, cantidades y proporciones requeridas para lograr un buen crecimiento y rendimiento de las plantas. Esa disponibilidad de elementos nutritivos por el sistema radical puede ser inmediata, constituyendo la fertilidad activa y representada por los nutrimentos en forma soluble de fácil absorción por las raíces. Otros elementos que no son de inmediata utilización por las plantas, como los que forman parte de los minerales primarios y secundarios y algunas combinaciones orgánicas, representan la fertilidad potencial de un suelo, y la producción de los cultivos depende en muchos casos de la transformación de las formas potenciales a las formas activas (Casanova, 2005).

La productividad del suelo es su capacidad para producir cultivos. Para que el suelo sea productivo es necesario que sea fértil. Sin embargo, un suelo fértil no es necesariamente productivo. Un suelo es fértil si contiene y suministra a las raíces cantidades necesarias adecuadas de nutrientes, agua y aire para que el cultivo crezca y produzca bien. Un suelo fértil tiene una estructura y profundidad adecuadas para proporcionar un ambiente favorable al desarrollo de las plantas.

El agricultor tiene la posibilidad de mantener y mejorar la fertilidad natural del suelo a través de la aplicación de medidas tales como las siguientes (Graetz, 1992):

- Análisis de suelos para determinar el suministro necesario de nutrientes
- Preparación adecuada del suelo
- Aplicación de fertilizantes y cal de acuerdo con los análisis y necesidades de los cultivos
- Restauración continúa del contenido de residuos vegetales y animales
- Adecuada rotación de cultivo

Kass, (1996) menciona que las variables del suelo que se evalúan en fertilidad son:

- Propiedades físicas
- Propiedades químicas
- Propiedades microbiológicas
- Propiedades externas al suelo (como el clima).

Las propiedades físicas incluyen la textura, la estructura, la profundidad efectiva, la conductividad hidráulica, la aireación, la compactación, la permeabilidad y la capacidad de retener agua. Las propiedades químicas incluyen la fertilidad natural, los cationes de intercambio, el pH, el contenido de materia orgánica, la saturación de bases, la saturación de acidez, el contenido de macronutrientes como carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, molibdeno y cloro. Las propiedades microbiológicas incluyen la actividad de organismos fijadores de nitrógeno, simbióticos o de vida libre, y de los organismos depredadores de residuos orgánicos, estos microorganismos se designan como micro flora del suelo. Las propiedades externas del suelo, incluyen la pendiente, el relieve, los procesos erosivos y la exposición a la radiación solar; las variables de clima que se evalúan son:

- Lluvia total por año y distribución anual.

- Registro de días secos, continuos o por total anual
- Temperatura promedio anual del aire y del suelo
- Velocidad de viento en km/hr y la humedad relativa en porcentaje
- Longitud del día
- Radiación solar.

Esta investigación está enfocada principalmente en las propiedades físicas y químicas del suelo, ya que son las variables que se contemplan en la Norma Oficial NOM-021-SEMARNAT-2001.

### 1.3.1. pH

La cantidad o concentración de iones de hidrógeno que posea la solución de un suelo determina la acidez o alcalinidad del mismo.

Cuando la concentración de  $H^+$  es alta en la solución se dice que es ácida, cuando es baja se dice que es básica o alcalina.

Un suelo es neutro ( $pH=7$ ) cuando las partículas de  $H^+$  han sido intercambiadas equilibradamente por otros cationes, como el  $Ca^{2+}$ , el  $Mg^{2+}$ , etc. Un suelo es ácido ( $pH<7$ ) cuando su solución tiene una mayor cantidad de  $H^+$  y es básico ( $pH>7$ ) cuando hay un exceso de otros cationes.

El pH se refiere a la concentración de  $H^+$  existente en la solución del suelo y no a los  $H^+$  del complejo absorbente (retenidos en los coloides), es decir que da una medición parcial y no total; los suelos pueden tener el mismo pH pero pueden variar en su comportamiento total de  $H^+$  (el del complejo absorbente más el de la solución del suelo) (Rodríguez, 1991).

El pH del suelo es uno de los parámetros más solicitados en los análisis del suelo, debido a que afecta la mayoría de los procesos biológicos, incluyendo el crecimiento de las plantas. Reacciones extremas en los suelos, tales como fuerte acidez o fuerte alcalinidad son indicativas de condiciones que interfieren en esos procesos.

Uno de los efectos más importantes del pH de los suelos está relacionado con la nutrición mineral de las plantas. La absorción de elementos nutritivos esenciales para el normal crecimiento y producción de las plantas se ve afectada a valores extremos de pH en suelos ácidos y en suelos alcalinos (Casanova, 2005).

De acuerdo con Rodríguez, (1991) en el suelo raramente se llega a un pH inferior a 4 (muy ácido) o a un pH de 10 (demasiado alcalino). Los suelos agrícolas generalmente tienen un pH entre 6 y 7.5, que es el rango en que mejor se desarrollan las plantas.

Los suelos ácidos son desfavorables para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, pues al disminuir el pH del suelo se frena el desarrollo de muchos microorganismos, disminuyen las cantidades de elementos nutritivos asimilables por las plantas y se incrementa la presencia de elementos tóxicos que las raíces absorben.

La menor aprovechabilidad de un nutrimento en el suelo generalmente está asociada con reacciones químicas que culminan en la formación de compuestos no absorbidos por el sistema radical de las plantas, creando su deficiencia en la planta que muchas veces se hace evidente a través de síntomas característicos en las hojas y frutos (Casanova, 2005).

### 1.3.2. Densidad

La densidad es una propiedad importante de una sustancia la cual hace referencia al cociente entre su masa y su volumen.

Las medidas precisas de la densidad deben tener en cuenta la temperatura, ya que las densidades de la mayor parte de los materiales, incluso la del agua, varían con la temperatura.

La densidad del agua es  $1.00 \text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$ . Cuando la densidad de un objeto es mayor que la del agua, se hunde en ella; cuando su densidad es menor flota (Mosca, 2006).

En suelo, la densidad se refiere al peso seco en gramos de materiales sólidos dentro de un volumen definido. Según Nuñez, (2000), el suelo está constituido por

partículas que difieren en tamaño y forma, e incluye espacios porosos entre partículas, las relaciones de masa por volumen originan dos conceptos: densidad aparente y densidad real o de partículas. Ambas se expresan en  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  y tienen un ámbito normal de valores que es influenciado por el tipo de material parental que dio origen al suelo, el contenido de materia orgánica, la presencia de ciertos minerales primarios en la muestra, el grado de compactación y parcialmente por la clase textural.

#### 1.3.2.1. Densidad aparente

La densidad aparente seca de un suelo da una indicación de la firmeza del suelo y con ella la resistencia que presentará a los implementos de labranza o raíces de las plantas cuando penetran en el suelo. La densidad aparente del suelo es definida por Smith, Sims y O'Neil, (1994) como la masa por unidad de volumen de suelo seco en su estado no disturbado.

La densidad aparente varía desde  $0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  o menos en suelos orgánicos, hasta  $1.6 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en suelos minerales. Puede llegar hasta valores de  $1.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en suelos arenosos y  $2.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en suelos compactados.

Como la densidad aparente incluye el espacio poroso, a mayores valores de densidad aparente disminuye proporcionalmente la porosidad del suelo.

Los valores de densidad aparente que presenten los suelos según Nuñez, (2001) son influenciados por:

- Contenido de materia orgánica
- Material parental que le ha dado origen
- Nivel de compactación. El paso continuo de maquinaria pesada o de animales de campo, o arar a una profundidad similar todos los años, puede producir capas compactas que dificultan la percolación del agua e impiden o restringen la penetración de las raíces; al análisis de laboratorio, tales capas presentan altos valores de densidad aparente.

#### 1.3.2.2. Densidad real

Se define como densidad real o densidad de las partículas a la relación entre el peso del suelo seco por unidad de volumen, sin incluir el espacio poroso.

La densidad real o específica relativa, tiene un ámbito de valores que oscila entre  $1.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en suelos de alto contenido de material orgánico, hasta  $2.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  si hay en el suelo minerales pesados como zircón o turmalina. Se acepta como promedio general o normal en los suelos una densidad real de  $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Esta densidad no se altera por diferencias de partículas o por cambios en el espacio poroso y es un reflejo de la densidad de los minerales más abundantes en los suelos.

#### 1.3.2.3. Porosidad

La relación entre la densidad aparente y la densidad real del suelo, permite calcular el porcentaje del espacio poroso ( $n$ ).

El espacio poroso total de un suelo es la fracción ocupada por aire y agua, y es definida principalmente por el arreglo de las partículas minerales (Casanova, 2005).

Por regla general, a menor porosidad los suelos son más compactos. Si estas partículas están arregladas en agregados, como ocurre frecuentemente en suelos de texturas medias y con buen contenido de materia orgánica, el espacio poroso será alto.

Este valor  $n$  no permite interpretar por sí solo las relaciones de infiltraciones o permeabilidad, a menos que se asocie con la clase textural correspondiente. Tampoco permite describir las relaciones entre agua y aire del suelo, a menos que se conozca el régimen de precipitación del área, se analice la influencia del relieve y se realice un balance hídrico, lo que implica determinar la evapotranspiración potencial y real de los suelos (Nuñez, 2000).

Relacionado con la clase textural, se debe asumir que tipo de poros predominan en el suelo: macro o micro-poros. Los macroporos o espacio poroso no capilar (EPNC) son responsables principalmente de la aireación de los suelos, y los micro

-poros, poros capilares o espacio capilar (EPC), están usualmente llenos con agua. Así, en suelos arenosos dominarán los macro-poros y el movimiento de agua y aire es relativamente rápido, mientras que en suelos arcillosos habrá predominio de poros capilares y la aireación puede ser inadecuada para el desarrollo de raíces y actividad de microorganismos (Casanova, 2005).

El límite entre macroporos y microporos ha sido fijado en un radio de 15 micras ( $\mu$ ), es decir, poros con radios mayores a 15 serán macroporos y menores a 15 serán microporos.

### 1.3.3. Contenido y retención de humedad

El suelo, desde el punto de vista hidrológico, es un depósito o almacén de agua cuya capacidad para retenerla y contenerla depende de sus propiedades físicas, sobretodo de la textura.

Maderey, (2005) menciona que un suelo está saturado cuando todos sus poros o espacios están llenos de agua, es decir, cuando el agua se encuentra llenando su porosidad. En esta situación el suelo se encuentra sin aire.

La fuerza que interviene cuando el suelo está saturado de agua es la gravedad, en esta situación el agua circula libremente entre los espacios y desciende en profundidad. Dicha agua se denomina libre o de gravedad. Este estado desaparece por percolación del agua en un tiempo que varía según la textura del suelo, horas en suelos arenosos y días en arcillosos. Después una parte de agua queda en el suelo, retenida por fuerzas superiores a la gravedad y al desaparecer parte del agua que saturaba al suelo, el aire llena el espacio que deja. El agua retenida por fuerzas superiores a la gravedad es el agua capilar, que llena los espacios capilares y es retenida por fuerzas capilares producida por el contacto aire-agua. En estos contactos se forman meniscos que retienen el agua a disposición de las plantas.

El agua capilar es la que verdaderamente retiene el suelo, por ello el agua de lluvia puede permanecer en el terreno a disposición de las plantas. El estudio del

agua capilar es importante para el riego, ya que es preciso conocer la capacidad de este depósito para poder cubrir las necesidades de las plantas.

Cuando el contenido de humedad es inferior a la capacidad de retención, el movimiento del agua se rige por difusión capilar hasta llegar al contenido de humedad que señala el punto de marchitez y, pasando éste, el desplazamiento del agua está regido por la evaporación. En este caso domina el potencial de fuerzas capilares sobre las restantes. La velocidad de circulación dependerá de los límites de humedad del suelo. Si la humedad es uniforme en todos los puntos del suelo, no hay movimiento.

#### 1.3.4. Materia orgánica

Foth y Turk, (1981), mencionan que al descomponerse las rocas y minerales de la corteza terrestre, los elementos minerales se hicieron asimilables por las plantas y a medida que de las provisiones de nitrógeno del aire se fueron produciendo reservas de nitrógeno en combinaciones químicas susceptibles de ser usadas, las plantas crecieron, murieron y contribuyeron con sus residuos al suelo, por lo tanto, la materia orgánica comenzó a acumularse. Esta condición se prolongó hasta que se alcanzó un equilibrio en el cual el grado de acumulación de la materia orgánica fue igual al grado de descomposición.

La materia orgánica está formada de materiales frescos, plantas parciales y completamente descompuestas, microorganismos y humus. El humus se encuentra constituido por sustancias resultantes de la alteración (desnaturalización, desorganización y cambios en la funcionalidad) de productos sintetizados por las plantas y los microorganismos. Con uniones débiles con la fracción acción mineral. De esta manera existen materias orgánicas heredadas, es decir, biomacromoléculas que son sustancias no húmicas con características químicas reconocibles, y materias orgánicas humificadas que son sustancias húmicas o humus en sentido estricto y se refieren a materiales transformados que

han perdido las características químicas de sus precursores (Porta, López Acevedo y Roquero, 2003).

La materia orgánica proporciona nutrientes tales como nitrógeno, fósforo y azufre. Respecto del suministro de nutrientes de parte del suelo mismo, la materia orgánica es la única abastecedora de nitrógeno.

Existen factores que influyen en el contenido de materia orgánica tales como: la vegetación, el clima, los organismos del suelo, la posición en una ladera, el drenaje, la textura, la composición mineralógica de las arcillas, la estructura y el laboreo.

En los suelos de cultivo, la materia orgánica procede de los residuos de las cosechas y de las enmiendas orgánicas aportadas. Con el laboreo se incorpora materia orgánica dentro del suelo, lo que favorece la mezcla con la materia mineral, la actividad de la fauna diminuta y los microorganismos del suelo, colaborando así a la descomposición y humidificación. Sin embargo, las prácticas agrícolas en los suelos cultivados agotan la materia orgánica. En tales casos, el humus se descompone y pierde su característica de agente estabilizador de la estructura del suelo (Porta *et al.*, 2003; Graetz, 1992).

La reposición del contenido de materia orgánica, después de un agotamiento, es un proceso lento. Por lo tanto se deben tomar medidas correctivas a través de la producción e incorporación de abonos verdes y residuos animales, y de la constante restitución de los residuos vegetales de las cosechas.

De acuerdo con Duchaufour, (2001) citado por Porta *et al.*, (2003), el contenido de materia orgánica del suelo se calcula a partir del análisis del C orgánico por vía húmeda o seca y multiplicando por un factor empírico que presupone que el C orgánico representa del orden de un 50% en suelos forestales y de un 58% en suelos de cultivo, ya que su materia orgánica está más estabilizada.

### 1.3.5. Textura

Porta *et al.*, (2003) nos dicen que el estudio de las partículas minerales puede llevarse a cabo con distintos enfoques, atendiendo al tamaño y forma de partículas, a su mineralogía, grado de meteorización, relaciones entre ellas, etc. Un planteamiento mucho más sencillo consiste en determinar la granulometría de la fracción mineral.

La granulometría expresa las proporciones relativas de las distintas partículas minerales inferiores a 2 mm, agrupadas por clases de tamaños en fracciones granulométricas, tras la destrucción de los agregados.

El interés en conocer la granulometría reside en que permite inferir otras propiedades y características directamente relacionadas con el uso y comportamiento del suelo:

- Capacidad de retención de agua disponible para las plantas.
- Facilidad para la circulación del agua.
- Riesgo de formación de sellado y de costra superficial: deficiente velocidad de entrada de agua en el suelo y mala nascencia.
- Riesgo de erosión hídrica.
- Riesgo de erosión eólica.
- Capacidad para almacenar nutrientes
- Capacidad para admitir aguas residuales, purines y otros residuos líquidos.
- Orden de magnitud de la superficie específica.

La textura es una expresión sintética de las características de cada horizonte dependiendo del tamaño de las partículas, por lo que la distinta proporción de arena, limo y arcilla define la textura de cada suelo.

La textura del suelo es calculada en campo a mano o es medida en el laboratorio con el hidrómetro y los resultados obtenidos se interpretan con el triángulo de textura para obtener la clase textural. Según Whiting, Wilson y Card (2011), de acuerdo al tamaño de las partículas, estas se dividen en tres clases para definir la

textura de un suelo. En el Cuadro 2 se muestran estas clases de textura, tamaño y descripción.

<b>Cuadro 2. Textura y tamaño de partículas del suelo</b>		
<b>Clase de textura</b>	<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Visibilidad (a simple vista)</b>
Arena	0.050 – 2.00	Partículas visibles
Limo	0.002 – 0.050	Partículas escasamente visibles
Arcilla	< 0.002	Partículas no visibles

Fuente: Whiting, Wilson y Card, 2011.

Existen tres tipos de arenas: arenas finas, medianas y gruesas. Las arenas añaden poco a las características del suelo y no aumentan significativamente el espacio de poro grande. Para que un suelo asuma las características de un suelo arenoso es necesario que se contenga un porcentaje mayor que 50% a 60% de medio de partículas de arena de tamaño grueso. Los suelos arenosos tienen buen drenaje y aireación, pero baja capacidad de retención de agua y nutrientes.

El limo tiene una textura suave y harinosa. El limo se asienta en el agua de movimiento lento y es común en la parte inferior de un canal de riego o lago. Su capacidad de retención de agua es similar a la arcilla.

Las partículas de arcilla son planas, en forma de placas y están cargadas negativamente. Son tan pequeñas en tamaño que se necesitan 12 mil partículas de arcilla en una línea para hacer una pulgada. La arcilla se siente pegajosa al tacto. Los suelos con alto contenido de arcilla tienen buena capacidad de retención de agua y nutrientes, pero la falta de espacio de poro grande restringe el movimiento de agua y aire. Los suelos arcillosos son también bastante propensos a problemas de compactación.

Para el propósito de riego, los suelos que mejor se comportan son los suelos francos, en vista de que los suelos arenosos y arcillosos no son los más apropiados y necesitan de un manejo especial cuando se les suministra riego. Los suelos arenosos retienen muy poca humedad, mientras que los arcillosos retienen porcentajes muy altos de humedad a tensiones altas, limitando la disponibilidad de agua para el cultivo (Leitón, 1985).

#### 1.3.6. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico se define como la capacidad que tienen las arcillas de adsorber y desadsorber cationes que se encuentran disponibles en la solución del suelo. Los cationes adheridos electrostáticamente en la superficie de la arcilla, pueden ser reemplazados por otro catión del suelo, los cuales son llamados cationes intercambiables (Nuñez, 2000).

Los cationes intercambiables proceden de la meteorización del material originario, de la mineralización de la materia orgánica y de aportes externos superficiales y subterráneos. Se hallan a una proporción considerablemente mayor que los cationes en solución (cationes solubles). El mecanismo de intercambio de cationes, que se da entre los cationes intercambiables y los solubles es un fenómeno que penetra y domina toda la química del suelo.

La propiedad del suelo de poder intercambiar iones y en concreto el tipo y clase de intercambio, tiene grandes repercusiones en el comportamiento del suelo (Porta *et al.*, 2003):

- Controla la disponibilidad de nutrientes para las plantas.
- Interviene en los procesos de floculación-dispersión de las arcillas y por consiguiente en el desarrollo de la estructura y estabilidad de los agregados.
- Determina el papel del suelo como depurador natural al permitir la retención de elementos contaminantes incorporados al suelo.

En términos químicos, Casanova, (2005) se refiere a la CIC como la cantidad de cationes retenidos en forma intercambiable a un determinado pH expresado en miliequivalentes por 100 gramos de suelo ( $\text{meq}\cdot 100\text{g}^{-1}$ ) o centimol por kg ( $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Un miliequivalente es la cantidad de un elemento o compuesto que es capaz de combinarse y desplazar un miligramo (0.001 g) de hidrógeno.

El predominio de ciertos cationes en los sitios de intercambios depende fundamentalmente de si el suelo tiene pH superiores o inferiores a 6.5. En condiciones de alcalinidad ( $\text{pH}>6.5$ ) los cationes que dominan son  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ . Estos cationes son denominados cationes básicos, debido a que bajo estas condiciones hay suficientes  $\text{OH}^-$  para hacer el sistema alcalino y el número de cargas positivas de estos cationes básicos supera el número de cargas negativas en la superficie de los coloides. En condiciones de acidez ( $\text{pH}<6.5$ ) los cationes predominantes son  $\text{H}^+$  y  $\text{Al}^{3+}$  y por esta razón se denominan cationes ácidos.

Exceptuando los iones de hidrógeno y los de aluminio, la suma de cationes intercambiables retenidos en las arcillas, como el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$  considerados en porcentaje respecto a la CIC, se denomina porcentaje de saturación de bases. La diferencia respecto al 100% representa la saturación de hidrógeno y aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) denominada acidez intercambiable (expresada en porcentaje). Ambas sumas corresponden a la capacidad de intercambio catiónico total (CICT) (Nuñez, 2000).

#### 1.3.7. Nutrientes

Para mantener un crecimiento sano de la planta, es necesario que el suelo posea un amplio rango de nutrientes. Es importante que los nutrientes se mantengan balanceados en el suelo para satisfacer las necesidades individuales de los cultivos.

Todas las plantas requieren los mismos nutrientes. Para las plantas cultivadas en condiciones intensivas, el objetivo del agricultor es impedir que el suministro de nutrientes imponga limitaciones de rendimientos. Para actuar así, es necesario

que las plantas dispongan de todos los nutrientes minerales esenciales y que la velocidad de suministro de cada uno sea, al menos, igual a la demanda de cultivos (Kass, 1996).

La carencia de uno o más nutrientes requeridos por la planta para su desarrollo normal, se manifiesta a través de la aparición de síntomas específicos en los cultivos. La naturaleza y magnitud de la disponibilidad o deficiencia de los nutrientes, puede determinarse por medio de los análisis de suelos y de los tejidos vegetales.

Las deficiencias de nutrientes pueden ocurrir debido a que el suelo carezca de ellos, o porque tales nutrientes se encuentren ligados a otros compuestos químicos, de tal modo que las plantas no pueden absorberlos.

Con criterios agronómicos, los elementos nutritivos se clasifican en macronutrientes que son absorbidos por la planta, según los casos, en cantidades moderadas o importantes, sus carencias son frecuentes y constituyen los componentes principales de los fertilizantes comerciales; nutrientes secundarios absorbidos por las plantas en cantidades moderadas y aunque sus carencias suelen ser menos frecuentes pueden adquirir cierta importancia en condiciones locales o regionales; y los micronutrientes, también llamados elementos traza u oligoelementos, absorbidos en pequeñas cantidades por las plantas. Los principales elementos nutritivos según Graetz, (1992) se muestran en el Cuadro 3:

<b>Cuadro 3. Clasificación de elementos nutritivos del suelo</b>		
<b>Macronutrientes</b>	<b>Nutrientes secundarios</b>	<b>Micronutrientes</b>
Nitrógeno (N)	Calcio (Ca)	Manganeso (Mn)
Fósforo (P)	Magnesio (Mg)	Cobre (Cu)
Potasio (K)	Azufre (S)	Zinc (Zn)

		Hierro (Fe) Molibdeno (Mo) Boro (B)
--	--	---

Fuente: Graetz, 1992.

En esta investigación la división de los nutrientes se realizó de la siguiente manera:

- Macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S)
- Micronutrientes (Mn, Cu, Zn, Fe, Mo, B)

#### 1.3.7.1. Macronutrientes

Dentro de estos se distinguen dos tipos: los elementos primarios, que de forma general requieren en mayor cantidad las plantas pero no se encuentran disponibles en la solución del suelo a tales proporciones, y son el nitrógeno, fósforo y potasio; y los elementos secundarios, los cuales necesita la planta en menores cantidades, pero que normalmente el suelo aporta los requerimientos necesarios para la planta, y son el calcio, magnesio y azufre.

##### 1.3.7.1.1. Nitrógeno (N)

El nitrógeno del suelo en condiciones naturales no proviene de la degradación de la roca madre, deriva del que existe en la atmósfera terrestre a través de los distintos procesos de fijación. Este elemento puede ser generalmente clasificado como inorgánico y orgánico, siendo esta última forma la predominante en el suelo. El N presente en suelos cultivables según Navarro y Navarro, (2013) procede de materiales diversos: restos de cultivos, abonos verdes, estiércol, fertilizantes comerciales y nitratos aportados por lluvias, así como por la fijación del nitrógeno atmosférico realizada por ciertos microorganismos.

Es fácilmente soluble en el agua del suelo y es solo parcialmente retenido por las partículas de este. Se pierde fácilmente por lixiviación. Este alimenta a los microorganismos y favorece así la descomposición de la materia orgánica fresca.

El N le da color verde sano a las plantas. Favorece un crecimiento rápido y aumenta la producción. Si se aplica en exceso, puede retardarse la maduración de la planta y favorecer la susceptibilidad a enfermedades (Graetz, 1992).

Si existe una deficiencia de este elemento se pueden observar síntomas característicos como: crecimiento enclenque, hojas pequeñas, con color verde amarillento uniforme, muerte de las hojas inferiores, maduración temprana, frutos y semillas pequeños.

#### 1.3.7.1.2. Fósforo (P)

Diferentemente al nitrógeno, que como ya se ha visto puede incorporarse a los suelos por medio de la fijación bioquímica por microorganismos, el fósforo no tiene tal ayuda microbiana. Este elemento procede solo de la descomposición de la roca madre durante el proceso de la meteorización, y representa alrededor de 0.1% de la corteza terrestre.

El fósforo total en el suelo puede clasificarse como inorgánico y orgánico. El P inorgánico es casi siempre predominante, excepto en los suelos donde la materia orgánica se halla en una gran proporción. El orgánico suele ser mayor en las capas superficiales que en el subsuelo, debido a la acumulación de materia orgánica en las mismas. Debe indicarse también, en cuanto al contenido total, que generalmente suele ser más alto en los suelos jóvenes vírgenes y en las áreas donde las lluvias no son excesivas. En los suelos cultivados, debido a que poco de este elemento se pierde por lixiviación, y de que las eliminaciones por cosechas son generalmente pequeñas, tiende a acumularse en las capas superficiales (Navarro y Navarro, 2013).

La mayor parte del fósforo normalmente presente en los suelos no es aprovechable por las plantas, debido a su gran insolubilidad; y que el elemento, para que pueda ser asimilado, es necesario que se encuentre como  $\text{HPO}_4^{2-}$  o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  en la disolución del suelo.

El P reacciona rápidamente con otros elementos químicos del suelo, por lo cual se forman componentes menos solubles. Por lo tanto, solo reducidas proporciones quedan disponibles para la planta. Un factor importante en esto es el pH ya que es el que condiciona el tipo de reacciones y situaciones posteriores que pueden aparecer en el suelo que controlan el aprovechamiento de este elemento.

En suelos ácidos el P forma compuestos insolubles con Fe y Al, mientras que en condiciones alcalinas son formados compuestos de Ca. Los compuestos particularmente formados dependen de las propiedades del suelo. Además la solubilidad y estabilidad de estos compuestos afecta la disponibilidad del P bajo condiciones de campo (Adams, 1995)

De acuerdo con Graetz, (1992) el P estimula la formación y crecimiento temprano de las raíces, favoreciendo un arranque vigoroso y rápido de la planta. Estimula la floración, acelera la madurez, y ayuda a la formación de la semilla. Mejora la resistencia contra el efecto de las bajas temperaturas en invierno.

La carencia de P muestra los siguientes síntomas: desarrollo pobre en las raíces, crecimiento lento de la planta, las hojas y tallos toman un color verde muy oscuro o púrpura, los cereales no pueden desarrollarse en macollas, la maduración se retrasa y los cultivos tienen baja producción en grano y fruto.

#### 1.3.7.1.3. Potasio (K)

El potasio presente en los suelos aparece por desintegración y descomposición de las rocas que contienen minerales potásicos. Junto a este potasio mineral hay que incluir también el procedente de la descomposición de restos vegetales y animales.

El K se halla en la mayoría de los suelos en cantidades relativamente grandes. Su contenido como  $K_2O$  varía de 0.5 a 3% y depende de la textura del suelo. La fracción arcillosa es la que presenta un contenido mayor, por lo que los suelos arcillosos y limo-arcillosos son más ricos que los limo-arenosos y arenosos.

En función de su aprovechamiento por las plantas, el K del suelo puede ser clasificado en tres categorías: potasio no asimilable, potasio lentamente asimilable y potasio rápidamente asimilable.

La mayor parte del K total del suelo (entre el 90 y 98%) está casi siempre en formas no aprovechables, es decir, no disponible para la planta. En este caso se encuentra por lo general formando parte de las estructuras y redes cristalinas de minerales primarios y secundarios.

Se puede considerar que aproximadamente el 1-2% de la cantidad total de este elemento en un suelo mineral medio es asimilable. En esta situación se encuentra en la disolución del suelo o como intercambiable adsorbido a los coloides. La mayor parte (un 90%) está en forma intercambiable y solo un 10% en la disolución (Navarro y Navarro, 2013).

La variación en el contenido de K según Stanley, (2007), está también influenciada por la intensidad de las pérdidas: extracción por cultivos, lixiviación y erosión.

La pérdida por lixiviación es menor en todos los suelos con excepción de los arenosos. Los rendimientos de las cosechas, generalmente, se reducen grandemente en los suelos deficientes en potasio. Mientras mayor es la productividad de la cosecha, más potasio se remueve o elimina del suelo.

El K aumenta el vigor de las plantas y su resistencia a enfermedades. Mejora su resistencia a los efectos de temperaturas frías. Mejora el llenado de los granos y semillas. Mantiene el desarrollo de las raíces y los tubérculos. Es esencial para la formación y transferencia de los almidones, azúcares y aceites.

La falta de este nutriente puede provocar: aparición de pequeñas manchas amarillas, blancas o café rojizas, quemaduras en los bordes y punta de la hoja, la raíz tiene un desarrollo pobre, acame del maíz y de los cereales y baja calidad del fruto y los tubérculos (Graetz, 1992).

#### 1.3.7.1.4. Calcio (Ca)

La concentración de calcio en la corteza terrestre es de aproximadamente 3.64% en promedio, pero su contenido muestra una gran variabilidad.

El Ca puede presentarse en contenido desde 1 hasta 25% en los suelos formados a partir de rocas calizas y otros materiales calcáreos, y en los suelos recientemente encalados. En las regiones húmedas el Ca es lixiviado y a medida que el suelo se acidifica, su lugar como catión de cambio sobre el complejo puede ir ocupándose por el Al (Wild, 1992).

En casi todos los suelos neutros o sólo ligeramente ácidos, el Ca ocupa la mayor parte de las posiciones de cambio de las arcillas y de los coloides húmicos. En los suelos arenosos de las regiones húmedas hay muy bajos contenidos de calcio, varía entre 0.7 y 1.5%, pero en los suelos muy meteorizados del trópico húmedo los contenidos oscilan entre 0.03 y 0.1% de calcio, independientemente de la textura.

Las pérdidas de calcio pueden ser por: lixiviación por agua de percolación, absorción por organismos del suelo, absorción por el complejo coloidal y coprecipitación como compuestos secundarios de calcio (Kass, 1996).

El Ca promueve la descomposición de la materia orgánica, el desarrollo de las raíces y la liberación de nutrientes. Mejora la estructura del suelo y la retención del agua. Es un constituyente de la pared celular, como tal aumenta la rigidez del rastrojo. Un exceso de este componente provoca una deficiencia de potasio, fosfato, magnesio, zinc, y hierro.

La ausencia de Ca se observa con las siguientes características: deformación de las hojas nuevas, punto de crecimiento débil, tallos delgados, raíces alargadas y arracimadas, hojas encarrujadas y los bordes de las hojas toman un color amarillo o café (Graetz, 1992).

#### 1.3.7.1.5. Magnesio (Mg)

El magnesio es un elemento muy abundante en la corteza terrestre. Según diversas estimaciones, su contenido medio puede situarse en un 2.3%.

De acuerdo con Navarro y Navarro (2013), en los suelos se encuentra como constituyente de numerosos minerales, mayoritariamente silicatos. En la descomposición de estos minerales, y también en la degradación de la materia orgánica que se incorpora al suelo como residuos diversos de animales y vegetales, el magnesio pasa en parte al estado de sales solubles y en este estado, al igual que ocurre con el calcio, puede tener distintos destinos: perderse por lixiviación, absorbido por los organismos del suelo, adsorbido o fijado por los coloides o precipitado como compuestos magnésicos secundarios, principalmente en regiones áridas.

Como ion intercambiable, en los suelos neutros o ligeramente ácidos el Mg es el segundo en importancia cuantitativa, después del Ca. El  $Mg^{2+}$  se comporta de forma análoga al  $Ca^{2+}$  en las reacciones de cambio, pero se ha comprobado que se transforma en no intercambiable cuando el pH de los suelos de carga variable se eleva mediante el encalado.

Se encuentran habitualmente respuestas positivas al aporte de Mg en tres clases del suelo, menciona (Wild, 1992): los arenosos con bajo contenido de magnesio intercambiable; algunos ácidos, pobres en Mg intercambiable y algunos muy ricos en K debido al antagonismo entre  $K^+$  y  $Mg^{2+}$ .

Teniendo en cuenta el origen en el suelo del magnesio, se deduce fácilmente que la mayor parte del mismo se encuentra bajo formas inutilizables por las plantas, este elemento es absorbido como  $Mg^{2+}$ . En consecuencia, y bajo el punto de vista de su aprovechamiento por la planta, se encuentra distribuido en el suelo como magnesio lentamente asimilable, asimilable y rápidamente asimilable.

El magnesio desempeña funciones importantísimas y esenciales en la planta. Sin este elemento no sería posible la vida sobre la Tierra, ya que entra en la

composición de los pigmentos verdes, utilización de la energía solar y la síntesis de los constituyentes orgánicos indispensables para la vida vegetal y animal. También porque actúa como coenzima específico de numerosas enzimas básicamente necesarias para la vida en todas sus formas.

Los síntomas característicos con los que se pueden observar la falta de este elemento en los cultivos son: pérdida de color verde en las hojas inferiores pero con su nervadura verde, tallos débiles, raíces amacolladas y aparición de rayas blancas o amarillo-claras en las hojas del maíz (Graetz, 1992).

#### 1.3.7.1.6. Azufre (S)

El contenido total de azufre en la corteza terrestre oscila entre 0.05 y 0.10%. El azufre se encuentra en el suelo en formas orgánicas e inorgánicas. Su disponibilidad está ligada principalmente al reciclaje de sustancias orgánicas, por lo cual, la mayor cantidad de azufre de los suelos se encuentra en formas orgánicas (Kass, 1996).

El contenido total de sulfato en los suelos oscila entre 1 y 10%. El S depositado en el suelo, procedente de la atmósfera, la lluvia, el agua de riego y de la materia orgánica, es absorbido por los cultivos y perdido por lixiviación y erosión, y solamente una pequeña parte puede volver a la atmósfera directamente.

Wild (1992), nos dice que los cultivos anuales con buenos rendimientos absorben entre 15 y 50 Kg·ha<sup>-1</sup> de S, cifras próximas a las de absorción de fósforo. En suelos bien aireados, el S se presenta fundamentalmente en forma de iones sulfato y como componente de la materia orgánica. En los suelos de las regiones áridas, donde las concentraciones de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> son elevadas, suele producirse yeso (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O). Los SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> están en la solución del suelo y son adsorbidos por las arcillas y por los óxidos de Fe y Al especialmente en condiciones ácidas.

De acuerdo con Navarro y Navarro, (2013), el azufre es absorbido por la planta casi exclusivamente en forma de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a través de su sistema radicular. En

pequeñas cantidades también puede ser absorbido del suelo como  $\text{SO}_3^{2-}$  y de la atmósfera como dióxido de azufre por las hojas a través de los estomas.

La cantidad de azufre existente en la planta varía dentro de los límites relativamente amplios y pueden situarse entre 0.1 y 1% de S en peso seco. Estos valores dependen no solo del contenido en el suelo, sino también de las necesidades fisiológicas propias de cada especie.

Al existir la falta de este elemento podemos encontrar ciertos síntomas como: plantas pequeñas y enclenques, tallos delgados y hojas amarillentas en hojas superiores, muy similares a la coloración que toman cuando carecen de nitrógeno (Graetz, 1992).

#### 1.3.7.2. Micronutrientes

Estos nutrientes se requieren solo en cantidades pequeñas y muy limitadas. No obstante, la deficiencia de uno o más de estos nutrientes puede tener mucha influencia sobre el rendimiento y desarrollo de los cultivos (Graetz, 1992). Si los suelos son incapaces de suministrar uno o más de los nutrientes necesarios, los cultivos no podrán beneficiarse al máximo del efecto favorable de una temperatura y precipitación adecuadas.

##### 1.3.7.2.1. Hierro (Fe)

El hierro puede considerarse como uno de los elementos principales, tanto en la corteza terrestre como en los suelos. Su potencial en la corteza terrestre es verdaderamente importante, alrededor del 5% (Navarro y Navarro, 2013). En los suelos, valores inferiores al 1% suelen encontrarse normalmente en suelos ácidos de textura gruesa o suelos turbosos. Kass, (1996) nos menciona que casi siempre tiene valores altos en suelos mal drenados o influenciados por cenizas volcánicas, con valores que oscilan entre 20 y 100 ppm.

El hierro puede ser absorbido por las plantas como ion ferroso y como ion férrico. La forma reducida ( $\text{Fe}^{2+}$ ) predomina en suelos mal drenados y con aireación deficiente, la forma oxidada ( $\text{Fe}^{3+}$ ) en suelos bien drenados.

La disponibilidad del hierro de acuerdo con Navarro y Navarro, (2013) es influenciada principalmente por el pH del suelo y el equilibrio de reducción–oxidación entre las formas férricas y ferrosas. La disponibilidad de ambas formas iónicas decrece con un incremento en el pH.

Comparado con su presencia abundante en los suelos, el contenido en las plantas es escaso, aunque en la mayoría de las veces más elevado que el de otros oligoelementos. En los tejidos normales varía desde 25 a más de 250 ppm en peso seco, dependiendo de la parte de la planta que se considere y de la especie. También nos menciona que puede hacerse una distinción entre el hierro total en las plantas y el hierro soluble o activo. Los contenidos de hierro activo aumentan rápidamente en el primer estado de crecimiento de la hoja, mientras que el hierro residual permanece en muy bajos niveles, acumulándose gradualmente en el desarrollo. El hierro activo puede transformarse en residual y de esta forma no es utilizable en la síntesis de la clorofila.

La deficiencia de hierro en casos moderados provoca el amarillamiento de las hojas más nuevas permaneciendo las venas de las hojas color verde, pero en casos severos, las hojas se vuelven color marfil sin una venación visible.

Las hojas presentan bandas de color claro en sus bordes y las raíces son cortas y muy ramificadas. El crecimiento de las plantas se retarda si la deficiencia es severa (Moreno, 2007).

#### 1.3.7.2.2. Manganeseo (Mn)

El manganeso puede presentarse en diversos estados de oxidación, aunque las investigaciones realizadas indican que la mayor parte, en la solución del suelo, se encuentra en  $\text{Mn}^{2+}$ . La reducción de los óxidos de manganeso es producto tanto de la actividad microbológica, directamente a través del proceso de respiración, como reducción química, por sustancias orgánicas liberadas por bacterias

heterotróficas. El ion  $Mn^{2+}$  desempeña el mismo papel en las estructuras minerales, que los iones  $Fe^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , aunque la abundancia de aquel es menor que la de estos (Adams, 1995; Thompson y Troeh, 1998).

Con pH inferior a 5.5 predomina el  $Mn^{2+}$ ; con pH superior a 8 predominan los óxidos insolubles. Oliveira, Afif y Mayor (2006), mencionan que la proporción entre la forma iónica asimilable y los óxidos insolubles depende, además del pH, de todos aquellos factores que afectan a los procesos de oxidación-reducción: aireación, temperatura, humedad, etc.

De acuerdo con Kass (1996), el Mn es absorbido activamente por la planta como  $Mn^{2+}$ . Si en el ambiente suelo-raíz existen altas concentraciones de formas iónicas como potasio, calcio, magnesio, cobre y zinc, su velocidad de absorción disminuye.

Las principales funciones del manganeso incluyen la fotosíntesis, la participación en procesos de oxidación-reducción, reacciones de descarboxilación, hidrólisis y actúa como activador enzimático en la respiración y metabolismo del nitrógeno.

Los síntomas de su deficiencia aparecen según Thompson y Troeh, (1998), primero en las hojas jóvenes y varían según las especies; en las plantas de hoja ancha, suelen presentarse clorosis entre las nerviaciones.

#### 1.3.7.2.3. Zinc (Zn)

El zinc fue uno de los primeros micronutrientes o elementos menores reconocido y aceptado como esencial para los cultivos y con mucha frecuencia es uno de los factores limitantes para obtener altos rendimientos. Aunque se requiere en pequeñas cantidades, una alta productividad es prácticamente imposible si el terreno es deficiente en este nutriente y no se corrige con aplicaciones al suelo o al cultivo (Huerta, 2012).

Las plantas absorben el zinc de la solución del suelo bajo la forma  $Zn^{2+}$  y también en forma de quelatos que se forman al combinarse con ciertos compuestos

orgánicos. La solubilidad es buena en pH ácido y prácticamente nula con pH neutro o básico (Oliveira *et al.*, 2006).

La asimilación del zinc está condicionada a situaciones antagónicas en el suelo como un pH alto, ya que la disponibilidad del zinc se reduce de manera significativa en la medida que sube el pH del suelo; a un exceso de fósforo, a una actividad biológica del suelo y a la materia orgánica, ya que una cantidad considerable de Zn puede ser fijada en la fracción orgánica de suelos con alto contenido de materia orgánica, haciéndolo poco disponible a los cultivos.

Kass (1996), nos dice que el zinc participa en diversos mecanismos enzimáticos y en la estabilidad de compuestos enzimáticos que contienen iones metálicos ligados a su estructura. También menciona que el zinc es importante en la producción de hormonas que regulan el crecimiento y además es esencial en varias reacciones del metabolismo de los cultivos. Es necesario en la producción de la clorofila y los carbohidratos.

De acuerdo con Oliveira *et al.*, (2006), la deficiencia de este microelemento provoca anomalías en el desarrollo de las plantas, ya que las hojas se alargan y los entrenudos se acortan. Las plantas que presentan mayor deficiencia son los cítricos, la vid y el maíz.

#### 1.3.7.2.4. Cobre (Cu)

De acuerdo con Bautista, (1999), el cobre se encuentra asociado a minerales sulfurosos simples y complejos, los cuales son fácilmente solubles a los procesos de intemperismo, especialmente en ambientes ácidos, también tiene una gran habilidad para interactuar químicamente con compuestos minerales y orgánicos del suelo.

El cobre es absorbido por la planta como  $\text{Cu}^{2+}$  o como complejo orgánico por vía radicular o foliar. No es muy móvil, aunque puede desplazarse en cierta proporción de las hojas viejas a las jóvenes. Es requerido por las plantas en muy pequeña

cantidad. Su contenido medio oscila generalmente entre 2 y 30 ppm en peso seco. Entre estos límites puede variar notablemente, dependiendo no solo de las características que presenta el suelo: composición, contenido en caliza, pH, etc., sino también de la planta: especie, grado de madurez, parte considerada, etc.

A menudo encontramos grandes cantidades de Cu en la solución de los suelos, el intervalo de la concentración soluble es de 3 a 135  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

Las características de deficiencia de cobre en las plantas se observan en primer lugar en los órganos más jóvenes, en ellos el efecto más característico es la deformación y muerte de las hojas jóvenes, después de aparecer clorosis, manchas pardas y necrosis en los bordes y ápice (Navarro y Navarro, 2013; Bautista, 1999).

#### 1.3.7.2.5. Molibdeno (Mo)

En la corteza terrestre el Mo se presenta con solo 2.3 ppm mientras que en los suelos su contenido es de 2.0 ppm, con un rango de 0.4 a 3.0 ppm para la mayor parte de los suelos agrícolas (De Santana, 1991).

Valderrama, (1997), indica que el Mo en los suelos se presenta en las siguientes formas: como anión en solución, adsorbido por los coloides, en la estructura cristalina de minerales del suelo y asociado a la materia orgánica. Suelos muy meteorizados pueden ser deficientes en molibdeno, mientras que suelos derivados de rocas graníticas, esquistos, pizarras y esquistos arcillosos, tienden a tener altos niveles de molibdeno. En cuanto a la textura, se han señalado deficiencias de molibdeno en suelos arenosos.

El Mo puede presentar varias valencias distintas, aunque la forma disponible predominante es el ion molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ). La solubilidad de este ion aumenta conforme asciende el pH, por tanto, las deficiencias de molibdeno pueden esperarse con mayor probabilidad en suelos ácidos dado que el anión tiende a polimerizarse. Valores menores de 0.5 ppm son considerados muy bajos (Thompson y Troeh, 1998; Valderrama, 1997).

Tiende a acumularse en el horizonte A, aumentando con el incremento de materia orgánica aún en suelos con pH bajo debido a la formación de complejos que evitan la fijación por el suelo en formas no disponibles. El molibdeno es retenido en la superficie de los óxidos de hierro amorfos y de aluminio.

El molibdeno es esencial en la fijación simbiótica de nitrógeno y en la reducción de nitratos a la forma amina. En consecuencia, la deficiencia de molibdeno puede causar una deficiencia de nitrógeno en la planta, siendo éste el primer síntoma que suele aparecer cuando el Mo se encuentre a niveles carenciales.

Otros síntomas son la formación de grandes manchas cloróticas entre las nerviaciones, circunstancia por la que desde hace años, se conoce la dolencia con el nombre de mancha amarilla; y la necrosis de las hojas viejas, aunque en algunas plantas las hojas pueden no presentar necrosis, pero aparecen curvadas y acaban muriendo, enfermedad conocida como cola de látigo, señalan Thompson y Troeh, (1998), y Taiz y Zeiger (2006).

#### 1.3.7.2.6. Boro (B)

En el suelo el boro se encuentra en cantidades extremadamente pequeñas, oscilando generalmente entre 2 y 100 ppm. La mayor parte, sin embargo, no es utilizable por la planta (Navarro y Navarro, 2013).

Ilín y Anikina, (1974) citados por Thompson y Troeh, (1998), identificaron varias formas de boro en el suelo: el boro soluble en agua, el ligado a la materia orgánica, el boro en los minerales de arcilla y los borosilicatos.

Las plantas absorben al boro en forma de ácido bórico, ( $H_3BO_3$ ) y en menor cantidad en forma de boratos  $H_2BO_3^{-1}$  (Kass, 1996).

Las plantas más exigentes en este elemento son: la remolacha, la alfalfa, los frutales, la viña y la coliflor. En las plantas participa en el crecimiento celular en los tejidos meristemáticos, en la translocación de azúcares, en la regulación del metabolismo de carbohidratos y en la síntesis de aminoácidos y proteínas.

El boro se acumula de acuerdo con Oliveira *et al.*, (2006) en las hojas viejas y su traslado hacia las hojas jóvenes se hace con dificultad. Como consecuencia de ello, los síntomas de carencia se manifiestan en primer lugar en los brotes y las hojas jóvenes, deformándolas.

Las regiones húmedas experimentan pérdidas de boro por lavado. Tales pérdidas, junto a la extracción por las cosechas, dan lugar a que un número, progresivamente mayor de suelos de estas regiones, manifiesten necesidad de boro como fertilizante. Los suelos más ácidos, lavados, ricos en arenas gruesas y los orgánicos exhiben esta tendencia de modo particularmente evidente. El sobreencalado de un suelo ácido puede reducir la disponibilidad de boro existente e inducir una deficiencia en este elemento (Thompson y Troeh, 1998).

#### 1.3.7.3 Metales pesados

De los metales que pueden estar presentes los que con mayor probabilidad pueden ser tóxicos para las plantas son el cobre, níquel, zinc y posiblemente el boro. Otros metales como el cadmio, plomo o mercurio pueden estar también presentes pero sus concentraciones no son en general lo suficientemente altas para tener un efecto adverso sobre el crecimiento de las plantas (Dalzell, Biddlestone y Thurairajan, 1991). El problema es, no obstante, que pueden acumularse en los tejidos vegetales para dar concentraciones que podrían ser perjudiciales para la salud de los hombres o los animales que consuman los cultivos.

La mayoría de las semillas, si caen en un suelo contaminado con altas concentraciones de estos metales, no germinan o si lo hacen, mueren antes de completar su desarrollo, menciona Lafuente, (2001). Sin embargo, debido a la gran variabilidad genética, existen semillas que en algunos casos son capaces de sobrevivir e incluso prosperar en suelos contaminados. Si estas plantas son usadas para consumo humano, pueden acarrear graves problemas.

Aunque los metales pesados antes mencionados, en grandes concentraciones son tóxicos, la NOM-021-SEMARNAT-2001 solo considera metales contaminantes al plomo, níquel y cadmio, ya que cuando se encuentran en grandes cantidades, normalmente provienen de fuentes antropogénicas contaminantes como lo es la industria y en menores cantidades de fertilizantes químicos, además de no ser elementos esenciales para el crecimiento de las plantas.

#### 1.3.7.3.1. Plomo (Pb)

El plomo es un elemento que representa aproximadamente el 0.0002% de la corteza terrestre. Las concentraciones normales de este elemento en el suelo oscilan entre 1 y 888 mg·kg<sup>-1</sup> para Fergusson, (1990), y entre 3 y 189 mg·kg<sup>-1</sup> según Kabata y Pendías (1985) y Kabata (2000), citados por Rodríguez (2008), siendo considerado tóxico en el suelo cuando alcanza concentraciones superiores a 100 mg·kg<sup>-1</sup>.

Es un elemento poco móvil y que se concentra en los horizontes superficiales ligado a la materia orgánica. Está fuertemente retenido, ya sea por el humus, sobre todo si contiene grupos <sup>-</sup>SH, o por las fases sólidas arcillosas en donde se adsorbe químicamente. La gran afinidad del plomo por el humus hace que, al igual que el mercurio, se acumule en los horizontes superficiales del suelo (Doménech y Peral, 2006).

En el suelo se encuentra principalmente en forma de Pb<sup>2+</sup>, también es conocido su estado de oxidación +4. El valor de pH desempeña un importante papel en la disponibilidad del plomo, cuanto menor sea el pH mayor cantidad de plomo se encontrará disponible en la solución del suelo. A pH alto es un elemento que precipita como hidróxido, sulfuro, fosfato o carbonato (Bautista, 1999; Rodríguez, 2008).

Las plantas absorben plomo principalmente del suelo, aunque pequeñas cantidades también las pueden tomar del aire, pero en general, una fracción muy pequeña de este elemento se encuentra a disposición de las plantas. La

absorción, en caso de presentarse, es de un modo pasivo, la tasa de absorción se reduce al aumentar el pH y por bajas temperaturas

El Pb a pesar de ser soluble en el suelo, es absorbido principalmente por los pelos de las raíces y es almacenado en un grado considerable en las paredes celulares, esta absorción varía significativamente en relación con la concentración presente en los suelos, así como por las varias formas en que el Pb se presenta. Inicialmente el plomo tiene un efecto positivo sobre el crecimiento de la planta, aunque en concentraciones superiores a  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  se produce un considerable retraso en el desarrollo que se acompaña con decoloración y anomalías morfológicas, pudiendo verse afectados diferentes procesos como la fotosíntesis, la respiración y el intercambio metabólico, llegando incluso a inhibir la asimilación de otros nutrientes (Rodríguez, 2008)

Kabata y Pendias (1989) citados por Bautista (1999), mencionan que la variación de los contenidos de Pb en las plantas se debe a anomalías geoquímicas, contaminación, variaciones estacionales, genotipos y habilidad para acumular al elemento. El Pb presenta posible antagonismo con el Zn y sinergismo con el Cd.

#### 1.3.7.3.2. Cadmio (Cd)

El cadmio es un metal considerado como no esencial para los sistemas biológicos y en muchos casos puede ser tóxico. Puede encontrarse en los alimentos, agua, suelo y/o aire, aunque normalmente en concentraciones relativamente bajas.

Posee una gran capacidad para disolverse en el agua del suelo, pasando a formar parte de las capas profundas y superficiales e incorporándose a estructuras biológicas. Todos estos mecanismos están regulados por factores como el pH, el tipo de suelo, la vegetación, etc.

Por otro lado los factores que más influyen en la presencia de Cd en los suelos, según Lafuente, (2001), son: los niveles atmosféricos de cadmio, la concentración del metal en las aguas de riego y en los fertilizantes usados.

La concentración del Cd en la solución del suelo es de 0.2 a 6  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; en suelos contaminados se han llegado a reportar concentraciones hasta de 400  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  (Bautista, 1999).

Cuando entra en el suelo el Cd se muestra bastante móvil y se distribuye uniformemente a lo largo del perfil del suelo. Se puede encontrar a distintas profundidades y en distinta forma molecular: ocupando sitios de intercambio catiónico en la fracción arcillosa y húmica, adsorbido o coprecipitado junto con óxidos e hidróxidos, precipitado como carbonato en suelos a pH superior a 7, precipitado como sulfuro en suelos reductores, adsorbido específicamente al material húmico formando quelatos estables y en la disolución del suelo en medios neutros-ácidos formando acuocomplejos o complejos de coordinación con otros aniones como el ion  $\text{Cl}^-$ .

El Cd es absorbido por las plantas, debido a su semejanza con el zinc, es así como ejerce su acción tóxica. Debido a esto, existe una preocupación particular para el cadmio dado que se mueve con la relativa facilidad desde las raíces hacia la parte aérea de la planta (Doménech y Peral, 2006).

#### 1.3.7.3.3. Níquel (Ni)

Las concentraciones de Ni en el suelo según Bautista, (1999), varían de 1 a 100  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  con una media de 20, esto depende principalmente de la roca madre y en algunos casos de los factores formadores del suelo como el clima, ya que se han encontrado altas concentraciones de níquel en zonas áridas y semiáridas. La concentración de níquel en la solución de los horizontes superficiales de los suelos varía de 3 a 25  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

El Ni ha sido considerado durante muchos años como elemento no esencial o tóxico para las plantas, pero diversos trabajos realizados sobre el árbol de pecano y en otras plantas, parecen indicar que el Ni cumple con el criterio indirecto de la esencialidad propuesto por Armon y Stout, (1934) citados por Malavolta y Moraes,

(2007), por lo tanto se incluye por algunos investigadores en la lista de micronutrientes esenciales

El níquel está presente en el suelo de varias formas: Ni en la solución del suelo, intercambiable y no intercambiable, Ni presente en minerales y asociado con la materia orgánica. Las formas solubles son las siguientes:  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{NiOH}^+$ ,  $\text{HNiO}_2^-$  y  $\text{Ni}(\text{OH})_3^-$ . En los suelos generalmente la solubilidad del níquel es inversamente proporcional al pH, es decir, a menor pH mayor solubilidad y viceversa (Malavolta y Moraes, 2007; Bautista, 1999).

Wells, (2005) y Wood, (2006) citados por Malavolta y Moraes, (2007), nos dicen que la deficiencia de Ni puede presentarse por bajos contenidos de formas disponibles en el suelo o puede ser inducida por varios factores como los siguientes:

- Altos contenidos de Ca, Mg, Cu o Zn que inhiben la absorción de Ni.
- Reducción de la disponibilidad por excesiva aplicación de cal, cuando el pH sube a 6.5.
- Las altas dosis de fertilizantes fosfatados o altos niveles de P del suelo que reducen la disponibilidad en el suelo o dentro de la misma planta.
- Nematodos que dañan al sistema radicular y que provocan una severa deficiencia.

La planta absorbe el Ni en forma de  $\text{Ni}^{2+}$ . Para Navarro y Navarro, (2013), en la mayoría de las plantas el contenido de Ni en los órganos vegetativos se encuentra en el rango de 1 a 10  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  peso seco, dependiendo de la disponibilidad en la que se encuentre en el suelo y la especie analizada.

Las plantas con carencias de Ni acumulan urea en sus hojas y como consecuencia de ello, los extremos de las hojas muestran necrosis. Las plantas que crecen en el suelo rara vez muestran signos de carencia de níquel, debido a que las cantidades de níquel requeridas son muy bajas (Taiz y Zeiger, 2006).

Se observan síntomas de toxicidad cuando se absorben niveles excesivos de Ni. Los síntomas incluyen clorosis por la reducción de la absorción de hierro (Fe), poco crecimiento de la raíz y de la parte aérea, la deformación de varias partes de la planta e inusuales manchas de las hojas, mencionan Mishra y Kar, (1974) citados por Malavolta y Moraes, (2007).

La recuperación de los suelos contaminados con Ni se realiza con la adición de caliza, fosfatos y materia orgánica debido a que de esta forma disminuye la solubilidad el níquel. Este elemento es altamente fitotóxico en concentraciones de 10 a 100 mg·kg<sup>-1</sup> en la planta (Bautista, 1999).

#### 1.4. CONDICIONES GEOGRÁFICAS Y CLIMATOLÓGICAS DEL ESTADO DE PUEBLA

El estado de Puebla se encuentra ubicado en el segmento sureste del territorio nacional mexicano, entre los meridianos 96°39'14" y 99°04'05" de longitud oeste y entre los paralelos 17°50'52" y 20°50'13" de latitud norte.

Puebla tiene una extensión de 34 306 kilómetros cuadrados (Km<sup>2</sup>), por ello ocupa el lugar 21 a nivel nacional y representa el 1.7% de la superficie del país.

Está delimitado al norte y al este por Veracruz, al sur por Guerrero y Oaxaca y al oeste por Hidalgo, Tlaxcala, México y Morelos (INEGI, 2011).

Desde que el clima es uno de los factores que ejerce más influencia en la formación de suelos, se agruparon 11 regiones climáticas de México, definidas según el Instituto de Geografía.

El Estado de Puebla pertenece a la región V Centro, en la clasificación de dichos suelos. Esta región se extiende a través de los Estados de Zacatecas (sur), Aguascalientes, Guanajuato, Hidalgo, Nayarit (este), Jalisco (excepto la costa) y el Distrito Federal, así como Michoacán (norte), México, Tlaxcala y Puebla. El clima es sub-húmedo, con algunas variantes; las temperaturas son semicálidas o templadas y las lluvias presentan un máximo en verano. Esta región ocupa 9.7 por ciento del territorio nacional (Améndola, Castillo y Martínez, 2005).

## 1.5. LA AGRICULTURA

La agricultura desde sus inicios (de 10000 a 15000 años) hasta la fecha, ha estado vinculada a la vida del hombre y la sociedad. Particularmente se relaciona con el crecimiento de la población y sus preferencias por los bienes que requiere (En Calva, 2007). Ésta contribuye a la seguridad del suministro de alimentos a través de aumentos de producción y por el comercio, pero debe admitirse que existen límites a esta seguridad. Las inestabilidades en agricultura pueden ser muy importantes y ni las sociedades agrarias en países de bajo nivel de ingresos, ni los complejos negocios agrícolas en países industrializados, son capaces, sin grandes dificultades, de proporcionar una seguridad suficiente ni de generar suficientes impuestos o ayuda monetaria para cubrir todas las posibles necesidades.

En sociedades agrarias con poca industria moderna, la mayoría de las familias tienen en la agricultura su principal ocupación. A medida que la productividad agrícola aumenta, que las actividades no agrícolas se van desarrollando y la mano de obra se va especializando, la agricultura y otros sectores económicos se hacen cada vez más claramente interdependientes. Se produce un aumento considerable de los insumos en las explotaciones (equipos mecánicos, energía, fertilizantes químicos, pesticidas, servicios para el procesado y la distribución de semillas, y otros) (Raeburn, 1987).

En el caso de México, la agricultura históricamente ha estado relacionada con las políticas agrarias, sociales y económicas del país. Lo más importante de la situación actual en cuanto a las modalidades o tipos de la agricultura lo constituyen las consecuencias en los rezagos sociales y económicos que cada vez son mayores entre los grupos de productores considerados. En consecuencia se destaca la importancia que debe recibir a corto, mediano y largo plazo el impulso a la agricultura de subsistencia y tradicional en México, para superar nuestros rezagos históricos, sociales y económicos promoviendo mejores estadios de vida y

oportunidad mediante su participación en proyectos productivos locales y regionales, con el respaldo de la investigación científica y tecnológica, así como de los servicios institucionales públicos y privados.

#### 1.5.1. Agricultura en Puebla

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2005), el estado de Puebla cuenta con una superficie de agricultura de 15491.95 km<sup>2</sup>.

La superficie sembrada total es de 1011921 hectáreas (ha). En el Cuadro 4 se muestran las superficies sembradas en las localidades estudiadas (INEGI, 2011).

<b>Cuadro 4. Superficie total sembrada en las localidades estudiadas</b>	
<b>Localidad</b>	<b>Superficie sembrada (ha)</b>
Acatzingo	10674
Aljojuca	6943
Soltepec	7064
San Juan Atenco	4772
Tochimilco	5489

Fuente: elaboración propia, 2015.

La superficie sembrada de maíz de grano en Puebla es de 589087 ha. En el Cuadro 5 se observan las superficies sembradas de maíz en las localidades estudiadas.

<b>Cuadro 5. Superficie sembrada de maíz en las localidades estudiadas</b>	
<b>Localidad</b>	<b>Superficie sembrada (ha)</b>
Acatzingo	4118
Aljojuca	5710
Soltepec	5380

San Juan Atenco	3596
Tochimilco	2816

Fuente: elaboración propia, 2015.

La superficie cosechada total en Puebla fue de 829994 ha. En el Cuadro 6 se encuentran las superficies cosechadas en las localidades estudiadas.

<b>Cuadro 6. Superficie cosechada en las localidades estudiadas</b>	
<b>Localidad</b>	<b>Superficie cosechada (ha)</b>
Acatzingo	8442
Aljojuca	4818
Soltepec	5564
San Juan Atenco	2069
Tochimilco	5489

Fuente: elaboración propia, 2015.

En Puebla el volumen de la producción de grano de maíz en toneladas fue de 611805 y el de las localidades estudiadas se muestra en el Cuadro 7.

<b>Cuadro 7. Volumen de la producción de grano de maíz en las localidades estudiadas</b>	
<b>Localidad</b>	<b>Volumen de la producción (t)</b>
Acatzingo	3431
Aljojuca	4673
Soltepec	4110
San Juan Atenco	934
Tochimilco	2996

Fuente: elaboración propia, 2015.

### 1.5.2. El maíz

Como ya hemos mencionado el maíz es la base alimenticia para la mayoría de la población del territorio mexicano y es la producción central de nuestros suelos estudiados.

El maíz tiene la capacidad de adaptarse productivamente a un gran espectro de condiciones ambientales, así lo encontraremos en parcelas que se encuentran al nivel del mar hasta altitudes de 3000 msnm, en zonas calientes, templadas y frías, en lugares con precipitaciones entre 500 y 1500 milímetros anuales, así como en una gran variedad de tipos de suelos (aun con restricciones de topografía y fertilidad) a lo largo de todo el territorio nacional (Espinosa, 1999).

A pesar de la gran capacidad que tiene el maíz de adaptarse a casi cualquier escenario, éste tiene unas necesidades nutricionales por unidad de producción similares a otros cereales, como el trigo o la cebada. Pero debido a sus producciones, habitualmente mucho más altas, las cantidades de nutrientes demandadas por el maíz, en términos absolutos, son mucho más elevadas.

El Cuadro 8 indica los requerimientos nutricionales (cantidad total de nutriente absorbida por el cultivo) promedio de maíz y la extracción en grano de los nutrientes esenciales para producir una tonelada de grano de maíz. Debe tenerse en cuenta que esta información resulta de numerosas referencias nacionales e internacionales y que existe una marcada variabilidad según ambiente y manejo del cultivo.

<b>Cuadro 8. Requerimientos nutricionales del maíz</b>			
<b>Nutriente</b>	<b>Requerimiento kg·t<sup>-1</sup></b>	<b>Índice de cosecha</b>	<b>Extracción kg·t<sup>-1</sup></b>
Nitrógeno	22	0.66	14.5
Fósforo	4	0.75	3.0
Potasio	19	0.21	4.0
Calcio	3	0.07	0.2

Magnesio	3	0.28	0.8
Azufre	4	0.45	1.8
Boro	0.020	0.25	0.005
Cloro	0.444	0.06	0.027
Cobre	0.013	0.29	0.004
Hierro	0.125	0.36	0.045
Manganeso	0.189	0.17	0.032
Molibdeno	0.001	0.63	0.001
Zinc	0.053	0.50	0.027

Fuente: García, 2010.

#### 1.5.2.1. Maíz orgánico

Para poder usar el término orgánico, además de no poner lo que oficialmente se considera una sustancia de origen sintético, se deben de cumplir muchos otros aspectos que buscan asegurar que se cumpla con los principios básicos de cuidado de la salud de los consumidores, de los trabajadores y del medio ambiente.

La atención en la agricultura orgánica no debe estar en lo que se aplica o no, sino en crear un ecosistema sustentable que genere plantas fuertes y que balancee los distintos organismos vivos involucrados, de tal manera que se pueda producir consistentemente alimentos de alta calidad y al mismo tiempo mejorar la capacidad de ese espacio para seguir produciendo en el futuro y su biodiversidad. Para ofrecer alimentos de calidad, los cultivos orgánicos se fertilizan y se cuidan, solamente que en este proceso, no se emplean productos que puedan dañar a los seres vivos, llámense personas, animales, la tierra, el medio ambiente o el agua. De hecho, una de las exigencias para los productores orgánicos es que tengan un plan de mejoramiento continuo de la fertilidad de los suelos (PRO-ORGÁNICO, 2014).

Un producto orgánico es aquel que en su cultivo o elaboración no emplea químicos sintéticos (agroquímicos) y debe de cumplir con ciertos requerimientos que controlan las agencias certificadoras. Algunos de estos requerimientos pueden ser que en esas tierras no se hayan aplicado agroquímicos sintéticos en por lo menos tres años, el aseguramiento de la calidad del agua de riego y lavado, los métodos establecidos para evitar la contaminación, la inspección de un agente independiente que verifique que se conozcan y se cumplan las normas establecidas, etc.

Para obtener la certificación de productos orgánicos, deben apegarse a los sistemas de producción y procesamiento establecidos en la Ley de Productos Orgánicos y las disposiciones que de ella derivan, en la que se establecen las sustancias, materiales e insumos permitidos y el manejo que debe observarse, para que un producto pueda ser considerado como orgánico. En México la certificación se obtiene a través de organismos privados, cuyos certificadores deben ser aprobados por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA, 2014).

## **CAPÍTULO II**

### **2. METODOLOGÍA**

La elaboración de esta investigación se realizó desde la recopilación de material bibliográfico referente al tema; la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis; además del uso de los instructivos, manuales y guías que se requirieron para la interpretación de resultados.

#### **2.1. ZONA DE ESTUDIO**

Esta investigación se realizó con nueve estaciones de muestreo de suelo en parcelas de las regiones de Acatzingo y Tochimilco del Estado de Puebla, resultado de la aceptación de los productores agrícolas para la realización de esta

actividad en sus terrenos. El muestreo se llevó a cabo después del levantamiento de cultivo, en los meses de marzo y abril del 2012. En el Cuadro 9 se muestra la localidad de cada estación, la región a la que pertenecen y su ubicación geográfica. Las coordenadas de cada estación fueron referenciadas geográficamente utilizando GPS marca Garnier.

<b>Cuadro 9. Ubicación geográfica de parcelas en las regiones de Acatzingo y Tochimilco</b>				
<b>E</b>	<b>Localidad</b>	<b>Región</b>	<b>Latitud Norte</b>	<b>Longitud Oeste</b>
1	San SebastiánTeteles	Acatzingo	19°03'30.77"	97°47'12.92"
2	San SebastiánTeteles	Acatzingo	19°03'10.52"	97°46'44.27"
3	Huilango	Tochimilco	18°50'15.21"	98°34'21.38"
4	Huilango	Tochimilco	18°51'08.94"	98°34'44.00"
5	Huilango	Tochimilco	18°50'06.12"	98°33'47.34"
6	Aljojuca	Acatzingo	19°05'29.15"	97°34'09.21"
7	San Juan Atenco	Acatzingo	19°01'23.91"	97°30'30.67"
8	Huilango	Tochimilco	18°51'49.06"	98°35'40.67"
9	Soltepec	Acatzingo	19°03'40.30"	97°44'08.32"

Fuente: elaboración propia con base en el trabajo de campo, 2012.

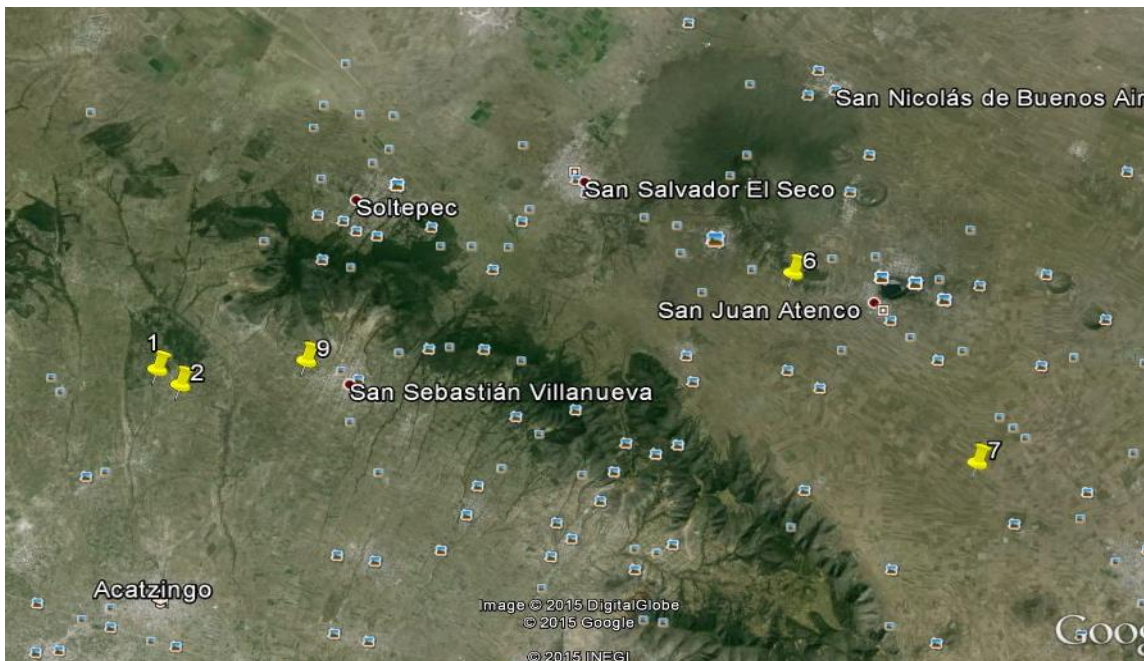
## 2.2. MUESTREO

Las estaciones se seleccionaron en terrenos de cultivo donde la cosecha próxima pasada fue de maíces criollos, rojos y azules; el muestreo se realizó siguiendo las especificaciones de la Norma Oficial NOM-021-SEMARNAT-2000 de acuerdo al procedimiento AS-01, obtención y preparación de la muestra.

Las estaciones de muestreo son parcelas sobreexplotadas que en cada ciclo agrícola no se han dejado descansar, al menos de la fecha actual a hace diez años, información adquirida de los propios productores.

Las parcelas presentan distintas pendientes, por lo que en las que son planas se muestreó en forma de zigzag y en las conformadas por terrazas o que presenten distintas pendientes se muestreó por el método sistemático. Aun cuando las parcelas sean de distintas dimensiones (media hectárea a hectárea y media) se tomó como criterio la toma de diez submuestras por terreno con un perfil de profundidad de 40 cm. La homogenización de las submuestras se realizó dentro de una tina de plástico, mezclado con una pala de plástico. Para cada muestra compuesta se pesaron 2 kg en una balanza granataria y se guardaron en una bolsa de plástico sellada herméticamente y debidamente etiquetada. Posteriormente fueron transportadas para su procesamiento en laboratorio.

En la Figura 1 se muestran las cinco estaciones correspondientes a la región de Acatzingo. En las Figuras 2 y 3 se observan las parcelas (1 y 2) correspondiente a San Sebastián Teteles; en la Figura 4, la parcela (6) de Aljojuca; en la Figura 5, la parcela (7) de San Juan Atenco; y en la Figura 6, la parcela (9) de Soltepec.



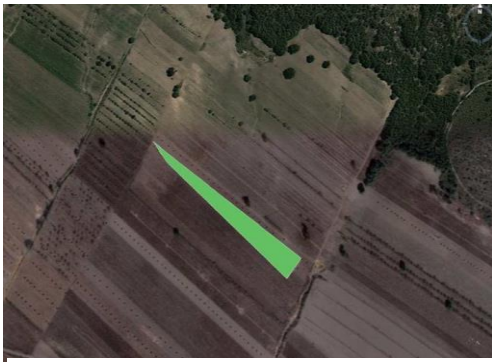
**Figura 1. Estaciones de muestreo de la región de Acatzingo**



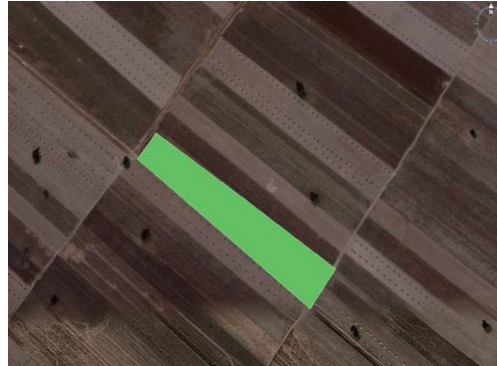
**Figura 2. Estación 1, San Sebastián**



**Figura 3. Estación 2, San Sebastián**



**Figura 4. Estación 6, Aljojuca**

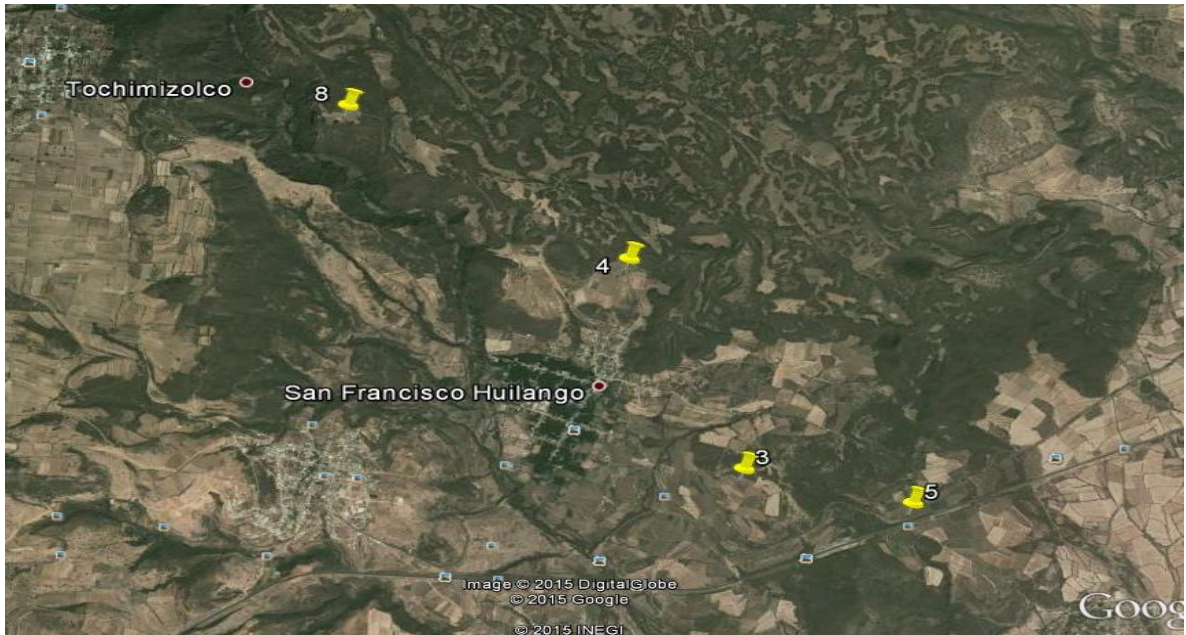


**Figura 5. Estación 7, San Juan Atenco**



**Figura 6. Estación 9, Soltepec**

En la Figura 7 se muestran las cuatro estaciones correspondientes a la región de Tochimilco. En las Figuras 8, 9, 10 y 11 se observan las parcelas 3, 4, 5 y 8 correspondientes a Huilango, respectivamente.



**Figura 7. Estaciones de muestreo de la región de Tochimilco**



**Figura 8. Estación 3, Huilango**



**Figura 9. Estación 4, Huilango**



Figura 10. Estación 5, Huilango



Figura 11. Estación 8, Huilango

### 2.3. PARÁMETROS DETERMINADOS

Las determinaciones físicas y químicas para evaluar la fertilidad de las nueve estaciones de muestreo de los suelos de las regiones de Acatzingo y Tochimilco se realizaron de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Dichas determinaciones se muestran en el Cuadro 10.

<b>Cuadro 10. Determinaciones físicas y químicas para evaluar la fertilidad de los suelos de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000</b>	
<b>Parámetros</b>	<b>Análisis de suelo</b>
Muestreo y preparación de la muestra	AS-01
Determinación de pH	AS-02
Densidad aparente	AS-03
Densidad real	AS-04
Contenido de humedad del suelo	AS-05
Contenido de materia orgánica	AS-07
Nitrógeno inorgánico	AS-08
Determinación de la textura del suelo	AS-09
Fósforo extraíble	AS-11

Capacidad de intercambio catiónico y cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K)	AS-13
Contenido de micronutrientos disponibles (Fe, Mn, Zn y Cu) y metales contaminantes (Pb, Cd y Ni)	AS-14
Contenido de Boro	AS-15

Fuente: elaboración propia, con base a la NOM-021-SEMARNATA-2000.

Los resultados obtenidos se compararon con los valores de referencia de cada parámetro descrito en la NOM-021-SEMARNAT-2000, así como también en el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe, 1996) y en la guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo (Vázquez., 1999).

### 2.3.1. Preparación de la muestra (AS-01)

La preparación de la muestra de suelo se realizó por el método AS-01, este incluye el traslado, recepción, registro, secado, molienda, tamizado, homogenización y el almacenamiento para su conservación.

#### Procedimiento:

- Durante el traslado fue necesario evitar el efecto de factores como la humedad exterior, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, luz, calor y otros materiales que pudieran cambiar la naturaleza de la muestra.
- Las muestras de suelo se secaron al ambiente, extendiendo cada muestra de suelo sobre una charola de plástico. Se colocaron a la sombra a temperatura no mayor a 35 °C y a una humedad relativa entre 30 y 70%.
- El suelo molido se pasó por un tamiz con aberturas de 2 mm de diámetro (malla 10) de acero inoxidable. Una vez tamizado se separó 1 kg de suelo y se homogenizó.
- Las submuestras se prepararon dependiendo el análisis que se realizó.

### 2.3.2. pH medido en agua (AS-02)

La determinación del pH se realizó por el método AS-02. El pH controla reacciones químicas y físicas en el suelo. La determinación del pH es afectada por varios factores: tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánicos que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la relación suelo: solución, etc.

Procedimiento:

- Se pesaron 10 g de suelo y se colocó en un vaso de precipitado.
- Se agregaron 25 mL de agua destilada y se llevó a agitación por 30 minutos en el agitador mecánico.
- Se calibró el potenciómetro con buffer pH 7, 4 o 10.
- Finalmente se leyó el pH de las muestras con el potenciómetro calibrado.

### 2.3.3. Densidad aparente

La determinación de la densidad aparente se determinó con el procedimiento indicado en la metodología de análisis físico-químico de suelos por Domínguez y Aguilera, (1984).

La densidad aparente de una muestra de suelo es calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa del suelo y el volumen total, es decir, el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso.

Procedimiento:

- Se pesó una probeta de 10 mL vacía.
- A esta probeta se le agregó suelo hasta los 10 mL, y se golpeó ligeramente (10 veces) sobre una franela.
- Posteriormente se le agregó el suelo que faltaba para llegar nuevamente a los 10 mL.
- Se pesó la probeta con el suelo y se hicieron los cálculos correspondientes.

#### 2.3.4. Densidad real (AS-04)

La densidad real del suelo se realizó por el método AS-04. La densidad real puede ser calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa y el volumen de una cierta cantidad del suelo. La masa es determinada pesando directamente el suelo y el volumen de manera indirecta por el cálculo de la masa y la densidad del agua desplazado por la muestra de suelo.

Procedimiento:

- Manipulando con pinzas, se pesó un picnómetro y se anotó el peso.
- Se agregaron el equivalente a 5 g de suelo usando un embudo y se pesó.
- Se le agregó una tercera parte de agua destilada cuidando de no mojar el picnómetro por fuera y se desplazó el aire.
- Posteriormente se dejó reposar 30 minutos y se desplazaron las burbujas de aire hasta que no quedara ninguna.
- Se llenó el picnómetro, cuidando que quedara lleno el tapón y se pesó.
- Una vez realizado esto, se lavó el picnómetro, se secó en la estufa a 105 °C por 2 horas, se dejó enfriar en un desecador, después se llenó con agua destilada y se pesó.

#### 2.3.5. Contenido de humedad en suelo (AS-05)

El contenido de humedad en suelo se determinó por el método AS-05. La determinación de la masa de agua se realizó por la diferencia en peso entre la masa del suelo húmedo y el suelo seco. Se consideró como suelo seco aquel secado a la estufa a 105 °C hasta obtener un peso constante.

Procedimiento:

- Para comenzar se lavó, limpió e identificó perfectamente los botes de aluminio utilizados.

- Se llevaron los botes hasta un peso constante.
- Posteriormente se pesó 10 g de muestra, se colocó en un bote de aluminio y se volvió a pesar el bote con el suelo.
- Se introdujo el bote destapado en la estufa a una temperatura de 105 °C y se dejó por 24 horas, transcurrido este tiempo se enfrió en un desecador y se pesó.
- Volvimos a introducir el bote a la estufa por 1 hora, se dejó enfriar, se pesó y se llevó a peso constante.

#### 2.3.6. Contenido de materia orgánica (AS-07)

La determinación del contenido de materia orgánica del suelo se hizo según Walkley y Black por el método AS-07. Se evalúa a través del contenido de carbono orgánico. Este método se basa en la oxidación del carbono orgánico del suelo por medio de una disolución de dicromato de potasio y el calor de reacción que se genera al mezclarla con ácido sulfúrico concentrado. Con este procedimiento se detecta entre 70 y 84% del carbono orgánico total por lo que es necesario introducir un factor de corrección.

#### Procedimiento

- Se pesó 0.5 g de suelo y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- Se adicionaron 5 mL de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) y se le agregó lentamente 10 mL de ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ).
- Se agitó por 1 minuto y se dejó reposar por 30 minutos.
- Se agregaron 100 mL de agua destilada y 5 mL de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ).
- Posteriormente se le agregaron 5 gotas de indicador bariosulfonato de difenilamina ( $C_{24}H_{20}Ba N_2O_6S_2$ ) y se tituló con sulfato ferroso ( $FeSO_4$ ).
- Se realizaron los cálculos correspondientes para obtener el porcentaje de materia orgánica y el porcentaje de carbono.

### 2.3.7. Nitrógeno total

El nitrógeno total se realizó por el método de Domínguez y Aguilera, (1984). Se utilizó como índice de disponibilidad de nitrógeno en el suelo. Su evaluación sirve para generar recomendaciones de fertilización.

Procedimiento:

- Se pesaron 5 g de suelo en la balanza analítica y se colocaron en un matraz Kjeldahl.
- Se agregó 10 g de mezcla digestora de sulfato de potasio y sulfato cúprico pentahidratado ( $K_2SO_4 \cdot CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ) y 25 mL de ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$ ).
- Se agitó hasta que se mezcló perfectamente.
- Se puso a digerir en el aparato de digestión hasta que la materia orgánica fue oxidada, lo cual se indicó por un color amarillo paja o gris claro de la solución.
- Pasada la digestión se dejó enfriar la mezcla.
- Se agregaron 200 mL de agua destilada y 100 mL de hidróxido de sodio (NaOH) al 40%.
- Se colocó el matraz en el destilador y el amoníaco ( $NH_3$ ) destilado se recibió en un matraz Erlenmeyer que contenía 50 mL de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ) al 4% y 5 gotas del indicador verde de bromocresol-rojo de metilo ( $C_{21}H_{14}Br_4O_5S - C_{15}H_{15}N_3O_2$ ).
- Se alcanzó un volumen aproximado de 160 mL, se retiró del destilador y se tituló con ácido clorhídrico (HCl) 0.1 N.
- Se hicieron los cálculos correspondientes.

Nota: Se hizo un blanco con el mismo procedimiento.

### 2.3.8. Determinación de la textura del suelo por el método de bouyoucos (AS-09)

La textura del suelo se determinó por el método AS 09. La textura del suelo se define como la proporción relativa de grupos dimensionales de partículas. Proporciona una idea general de las propiedades físicas del suelo.

#### Procedimiento:

- Se pesó 50 g de suelo y se colocó en el vaso de la batidora.
- Se agregaron 15 mL de oxalato de sodio ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ), 15 mL de metasilicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) y se le agregó agua destilada hasta la segunda ranura.
- Se agitó por 10 minutos en el agitador mecánico, se pasó a una probeta de 1000 mL y se aforó con agua destilada a 1000 mL.
- Se agitó por 1 minuto para que la muestra fuera homogénea, se dejó reposar por 40 segundos y se tomó la primera lectura del hidrómetro y la temperatura.
- Se dejó reposar por 2 horas y se tomó la segunda lectura del hidrómetro y temperatura.
- Se hicieron los cálculos correspondientes y se vio la textura en el triángulo.

### 2.3.9. Fósforo extraíble (AS-11)

La determinación del fósforo extraíble se realizó según el método AS-11 para suelos ácidos a neutros. El fósforo (P) determinado con este procedimiento ha mostrado una estrecha relación con las respuestas de los cultivos. La solución extractora de P remueve formas de P ácido solubles como los fosfatos de calcio y una porción de fosfatos de aluminio y hierro.

#### Procedimiento:

- Se pesó 1 g de suelo y se colocó en un tubo de ensaye.
- Se adicionó 7 mL de solución extractora ácido clorhídrico-fluoruro de amonio ( $\text{HCl}-\text{NH}_4\text{F}$ ) y se agitó 1 minuto.

- Se filtró con papel Whatman No.42.
- Se tomó 1 mL del filtrado y se agregaron 6 mL de agua desionizada y 2 mL de molibdato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O).
- Se mezcló bien y hasta que se iba a leer se le agregó 1 mL de cloruro estañoso diluido (SnCl<sub>2</sub>) y se mezcló nuevamente.
- Pasados 10 minutos se leyó la intensidad de color en el espectrofotómetro.

Nota: Antes de realizar el procedimiento en las muestras de suelo se hizo la curva de calibración con soluciones estándares de P y el blanco.

#### 2.3.10. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico total

El procedimiento para determinar la CICT se determinó por el método de Domínguez y Aguilera, (1984).

Procedimiento:

- Se pesó 1g de suelo y se colocó en un tubo de centrifuga.
- Se le agregaron 5 mL de cloruro de calcio y se mezcló con un agitador de vidrio.
- Se le agregaron otros 5 mL de cloruro de calcio.
- Se centrifugó durante 5 min a 3000 rpm, se decantó y se desechó.
- Esto se realizó 5 veces.
- Posteriormente se le agregaron 5 mL de alcohol etílico, se centrifugó y se desechó.
- Este procedimiento se realizó 5 veces.
- Después se adicionó 5 mL de cloruro de sodio, se agitó, se centrifugó y se guardó para posteriormente titular.
- Esto se hizo 5 veces.
- Finalmente se tituló con EDTA y se realizaron los cálculos correspondientes.

### 2.3.11 Determinación de cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K).

Para determinar los cationes intercambiables se utilizó el método de Domínguez y Aguilera, (1984).

Procedimiento:

- Se pesó 1 g de suelo y se colocó en un tubo de centrifuga.
- Se agregaron 5 mL de acetato de amonio 1N a un pH=7 y se agitó con un agitador de vidrio.
- Se agregaron otros 5 mL de acetato de amonio
- Se centrifugó durante 5 min a 3000 rpm, se decantó el sobrenadante en un frasco y se reservó.
- Esto se realizó 5 veces.
- Posteriormente el sobrenadante se vació a un matraz de 50 mL y se aforó.
- Finalmente se filtró con papel Whatman No 42.

Para Ca y Mg:

Para determinar los cationes intercambiables de Ca y Mg, primero se hace una titulación en la que se encuentran los dos cationes y posteriormente se hace otra titulación para encontrar solo Ca.

- Se tomaron 10 mL del filtrado y se colocaron en un matraz Erlenmeyer.
- Se agregó 10 mL de solución buffer pH10 y 5 gotas de cianuro de potasio (KCN) al 2%.
- Después se le agregaron 5 gotas de clorhidrato de hidroxilamina y 5 gotas de negro de eriocromo T.
- Se tituló con EDTA.
- Para Ca se tomaron 10 mL del filtrado y se colocaron en un matraz Erlenmeyer.
- Se le agregó 5 mL de NaOH al 5% y murexida como indicador.
- Se tituló con EDTA y se hicieron los cálculos correspondientes.

Para Na y K:

- La determinación de sodio y potasio intercambiables se hizo en el filtrado restante de la determinación de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .
- Se leyó por flamometría preparando la curva de calibración correspondiente (diluida en acetato de amonio).

### 2.3.12 Determinación de micronutrientes y metales contaminantes (AS-14)

La determinación de las concentraciones de metales pesados totales se llevó a cabo por el método de espectrofotometría de absorción atómica de flama con mezcla aire-acetileno utilizando el programa Winlab32AA flama en un equipo Pekín Elmer AAnalyst 4000 a través del método (AS-14).

Procedimiento:

- Se pesaron 10 g de cada muestra y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 125 mL.
- Se adicionó 20 mL de DTPA.
- Se taparon los matraces con papel parafilm y se agitó por dos horas.
- Pasada la agitación se filtraron las muestras con papel Whatman No. 42.
- Se realizaron curvas de calibración con las soluciones estándares de los siguientes metales pesados: Ni, Mn, Zn, Fe, y Cd. El Cuadro 11 muestra la longitud de onda de cada metal pesado mencionado anteriormente.

<b>Cuadro 11. Longitud de onda de metales pesados Ni, Mn, Zn, Fe, Cd</b>	
<b>Metal pesado</b>	<b>Longitud de onda nm</b>
Ni	232.00
Mn	279.50
Zn	213.86
Fe	248.30
Cd	228.80

Fuente: Sánchez y Pérez, 2014.

- La determinación de las concentraciones de metales pesados se obtuvieron en ppm.

Nota: Se realizó un blanco por cada metal pesado determinado.

### 2.3.13 Determinación del contenido de boro (AS-15)

El procedimiento para determinar el contenido de boro en el suelo se realizó por medio del método AS-15. La extracción del boro del suelo se hace con una solución de cloruro de calcio 1.0M, ya que debido a la acción floculante del calcio sobre los componentes del suelo no se presenta turbidez en los extractos.

Procedimiento:

- Se pesaron 15 g de suelo, se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 125 mL y se le agregaron 30 mL de la solución extractora de cloruro de calcio 1M ( $\text{CaCl}_2$ ).
- Se colocaron en una parrilla eléctrica y se dejó hervir por 5 min, posteriormente se filtró con papel Whatman No.42. hasta obtener un extracto claro.
- Una vez filtrado, se tomaron 2 mL del extracto y se colocaron en la celda.
- Se agregaron 4 mL de solución amortiguadora de acetato de amonio, EDTA y ácido acético glacial ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ ) y 2 mL de solución de azometina-H (azometina-H y ácido ascórbico).
- Se agitó y se dejó reposar una hora.
- Finalmente se leyó en el fotocolorímetro a 420 nm.

Nota: Antes de realizar el procedimiento en las muestras de suelo se hizo la curva de calibración con soluciones estándares de B y el blanco.

## **CAPÍTULO III**

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de cada parámetro que refieren a la fertilidad del suelo para cada una de las nueve estaciones de las regiones de Acatzingo y Tochimilco, Puebla. Tomando como referencia la NOM-021-SEMARNAT-2000 y manuales de evaluación de fertilidad, se da la interpretación de los resultados y su discusión. También se presentan los resultados por región con un fin comparativo en cuanto a su fertilidad.

#### **3.1 RESULTADOS POR PARÁMETRO DETERMINADO**

##### **3.1.1. Resultados de pH**

Los resultados obtenidos de pH presentaron valores de 4.6 a 6.8, con una media de 5.6. El menor valor se encuentra en la estación 4 de Huilango, mientras que el mayor valor es de la estación 1 del municipio de San Sebastián Teteles correspondiente a la región de Acatzingo. En el Cuadro 12 se muestran los resultados de pH de las nueve estaciones estudiadas. En la figura 12 se muestra la comparación de los resultados de esta determinación.

De acuerdo a los criterios que establece la NOM-021-SEMARNAT-2000 los suelos se clasifican como moderadamente ácidos, con excepción de la estación 1 que se considera neutra y la estación 4 que resulta ser fuertemente ácida.

Cuadro 12. Resultados pH	
E	pH
1	6.8
2	5.8
3	5.2
4	4.6
5	5.4
6	6.1
7	5.7
8	5.2
9	6.1
Prom	5.6

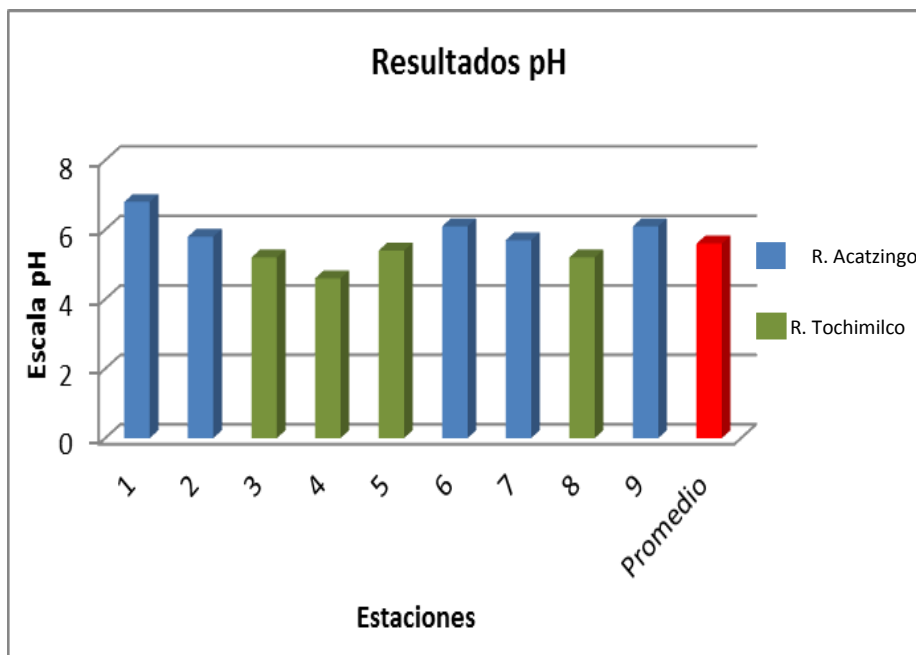


Figura 12. Comparación de los resultados de pH de las nueve estaciones determinadas

Rodríguez, (1991) nos dice que el rango de pH que generalmente tienen los suelos agrícolas se encuentra entre 6 y 7.5.

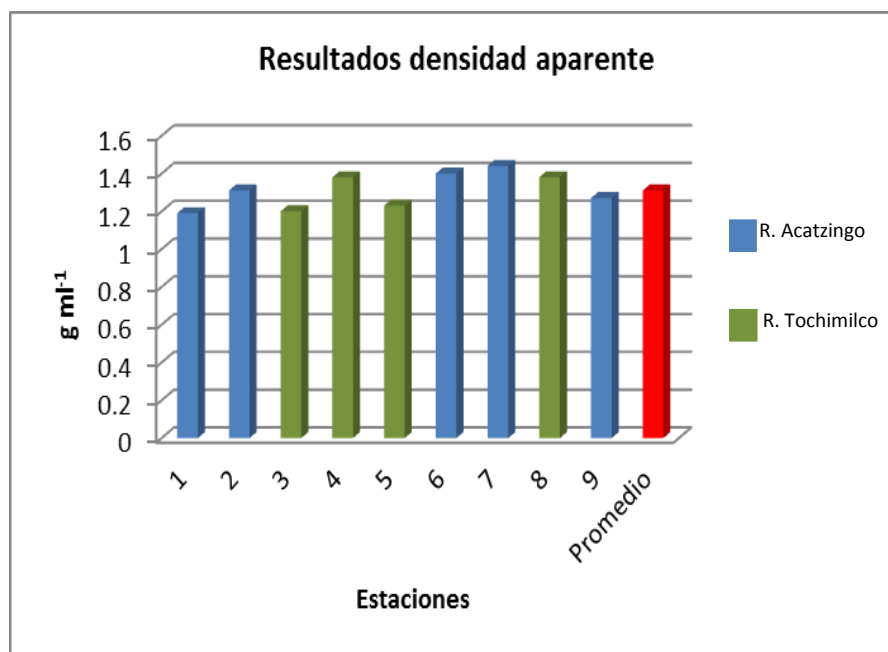
En la guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo, Vázquez, (1999) cita a Ojeda (1975), quien nos dice que el pH óptimo para el crecimiento del maíz (*Zea Mays*) va de un rango de 6 a 8. De acuerdo con los criterios anteriores las estaciones que presentan un pH óptimo para la agricultura son la 1, 6 y 9; mientras que las estaciones 2 y 7 están ligeramente por debajo del rango mínimo, y el resto presentan un pH menor.

### 3.1.2. Resultados de densidad aparente (D.A)

La densidad aparente mostró un valor mínimo de  $1.19 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$  en la estación 1 de San Sebastián Teteles y un valor máximo de  $1.44 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$  en la estación 7 correspondiente de San Juan Atenco, y tuvo una media de  $1.31 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ . En el Cuadro 13 se observan los resultados de las estaciones estudiadas y en la Figura 13 la comparación entre cada estación.

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, las estaciones 2, 3, 5 y 9 presentan un tipo de suelo francoso, las estaciones 4, 6, 7 y 8 arenoso y la 1 arcilloso.

<b>Cuadro 13. Resultados D.A</b>	
<b>E</b>	<b>g·mL<sup>-1</sup></b>
1	1.19
2	1.31
3	1.20
4	1.38
5	1.23
6	1.40
7	1.44
8	1.38
9	1.27
Prom	1.31

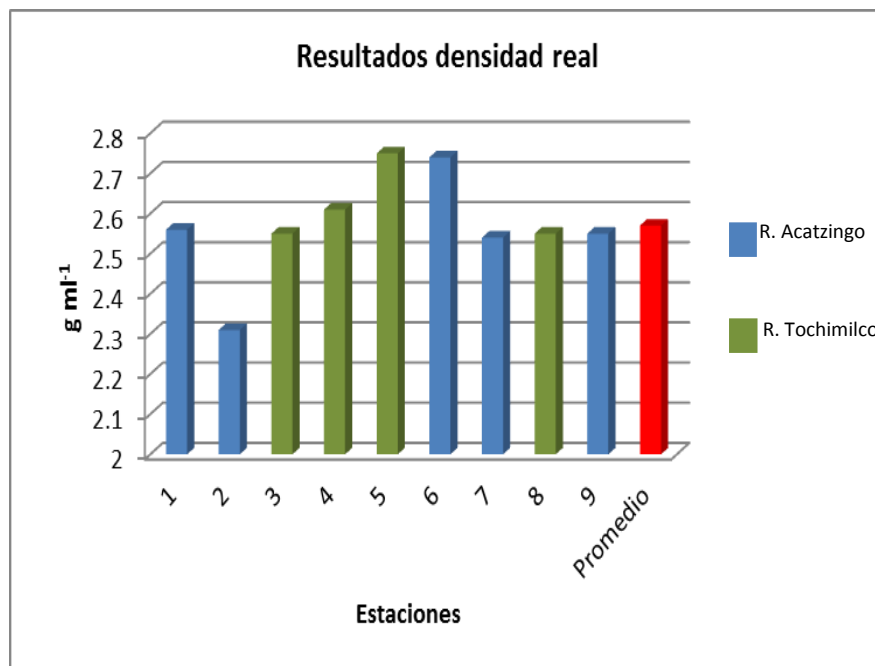


**Figura 13. Comparación de los resultados de la densidad aparente de las nueve estaciones determinadas**

### 3.1.3. Resultados de densidad real (D.R)

Los resultados que se obtuvieron en la densidad real varió de 2.31 a 2.75 g·mL<sup>-1</sup> y un valor medio de 2.57 g·mL<sup>-1</sup>. El mínimo valor se encontró en la estación 2 correspondiente a San Sebastián Teteles y el máximo en la estación 5 ubicada en Huilango. Los resultados de la densidad real se observan en el Cuadro 14 y la Figura 14.

<b>Cuadro 14. Resultados D.R.</b>	
<b>E</b>	<b>g·mL<sup>-1</sup></b>
1	2.56
2	2.31
3	2.55
4	2.61
5	2.75
6	2.74
7	2.54
8	2.55
9	2.55
Prom	2.57



**Figura 14. Comparación de los resultados de la densidad real de las nueve estaciones determinadas**

Núñez (2001), nos dice que los valores de densidad real cercanos a  $1.65 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$  indican alto contenido de materia orgánica en los suelos y que se acepta como promedio general una densidad real de  $2.65 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$  en suelos normales, lo que nos dice que las estaciones estudiadas presentan bajo contenido de materia orgánica y un contenido normal de minerales presentes en el suelo.

#### 3.1.4. Resultados de porosidad

La porosidad obtuvo un valor máximo de 55.27% en la estación 6 que corresponde a San Sebastian Teteles, y un valor mínimo de 43.29% en la estación 2 la cual pertenece a Aljojuca; el promedio de porosidad fue de 48.94%. En el Cuadro 15 se muestran los resultados obtenidos, y en la Figura 15. la comparación entre estaciones.

<b>Cuadro 15. Resultados de porosidad</b>	
<b>E</b>	<b>%</b>
1	53.52
2	43.29
3	52.94
4	47.13
5	55.27
6	48.91
7	43.31
8	45.88
9	50.20
Prom	48.94



**Figura 15. Comparación de los resultados de porosidad de las nueve estaciones determinadas**

De acuerdo con el Manual de Procedimientos Analíticos de Flores y Alcalá (2010), las estaciones 2, 4, 6, 7 y 8 poseen una porosidad media, y las estaciones restantes una porosidad alta, lo que indica buena aireación del suelo, buena infiltración de agua y permiten la penetración de las raíces sin dificultades. Los suelos bajo sistemas de producción agrícola tienden a compactarse pero al contar con buena porosidad conservan potencialidad en su producción.

### 3.1.5. Resultados del contenido de humedad (%H)

El porcentaje de humedad mostró un valor mínimo de 1.04% en la estación 7 de San Juan Atenco y un valor máximo de 3.91% en la estación 9 perteneciente a Soltepec, con una media de 2.41%. En el Cuadro 16 se observan los resultados y en la Figura 16 se muestra la comparación entre los suelos.

En cuanto al contenido de humedad todas las estaciones mostraron un bajo porcentaje, lo que indica un bajo contenido de agua por volumen de suelo.

Cuadro 16. Resultados %H	
E	%
1	2.98
2	2.10
3	2.99
4	1.30
5	3.24
6	1.45
7	1.04
8	2.68
9	3.91
Prom	2.41



**Figura 16. Comparación de los resultados del contenido de humedad de las nueve estaciones determinadas**

De acuerdo con el Reporte del Clima en México del Servicio Meteorológico Nacional (2012), Puebla fue el cuarto estado que presentó más lluvias durante el 2012, donde en los meses de marzo y abril hubieron precipitaciones con valores de 29.3 y 42.1 mm del espesor de la lámina ( $L \cdot m^{-2}$ ), respectivamente. Estos valores de precipitación son los más bajos correspondientes a los trimestres enero-febrero-marzo y abril-mayo-junio. El promedio nacional de la temperatura fue de  $21.9^{\circ}C$ , colocando al 2012 como el segundo año más cálido desde 1971 hasta esa fecha, por lo que estas condiciones climatológicas, junto con los escurrimientos en la región de Tochimilco y la falta de riego en las 9 estaciones, ocasionaron un porcentaje de humedad muy bajo.

### 3.1.6. Resultados de materia orgánica (% M.O)

Los valores en cuanto a materia orgánica variaron de 0.44% a 2.37%, con un promedio de 1.07%. La estación 6 perteneciente a Aljojuca obtuvo el mínimo valor, mientras que la estación 8 de Huilango obtuvo el máximo. Los resultados se

observan en el Cuadro 17. En la Figura 17 podemos ver las comparaciones del contenido de materia orgánica de las nueve estaciones.

<b>Cuadro 17. Resultados %M.O</b>	
<b>E</b>	<b>%</b>
1	1.02
2	0.80
3	0.93
4	1.16
5	1.21
6	0.44
7	0.80
8	2.37
9	0.90
Prom	1.07



**Figura 17. Comparación de los resultados del contenido de materia orgánica de las nueve estaciones determinadas**

Con lo relacionado a la determinación de materia orgánica en la NOM-021-SEMARNAT-2000, se dice que las estaciones 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 9 son bajas en materia orgánica, la estación 6 es muy baja y la estación 8 fue la única que tiene un porcentaje de materia orgánica medio, por lo que el porcentaje de carbono orgánico es muy bajo en todas las estaciones.

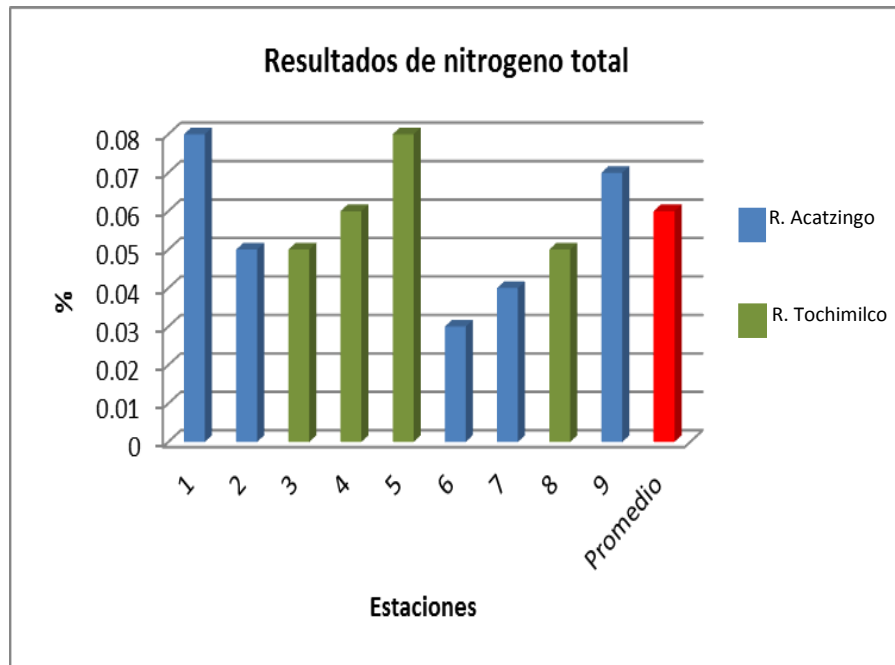
De acuerdo con Velasco, (1983) citado por Vázquez, (1999), la estación 6 se considera extremadamente pobre; las estaciones entre 0.6 y 1.2% de M.O. se clasifican como pobres, valores en los que entran las estaciones 1, 2, 3, 4, 7 y 9; la estación 5 al estar entre valores de 1.21 y 1.8% se cataloga como medianamente pobre y la estación 8 como un porcentaje medio de M.O.

En el Manual de Fertilidad y Fertilizantes de Etcheveres y Espinoza (1971), nos dicen que los suelos que tienen de 2 a 3 % de M.O. son adecuados para el cultivo, por lo que solo la estación 8 entra en este intervalo.

### 3.1.7. Resultados de nitrógeno total (% N.T)

El porcentaje de nitrógeno total tuvo un valor mínimo de 0.03% en la estación 6 de Aljojuca y un valor máximo de 0.08% en las estaciones 1 y 5 pertenecientes a San Sebastián Teteles y Huilango respectivamente, con un valor medio de 0.06%. Los resultados del porcentaje de nitrógeno total se muestran en el Cuadro 18 y en la Figura 18 se observan las comparaciones entre las estaciones.

<b>Cuadro 18. Resultados %N.T.</b>	
<b>E</b>	<b>%</b>
1	0.08
2	0.05
3	0.05
4	0.06
5	0.08
6	0.03
7	0.04
8	0.05
9	0.07
Prom	0.06



**Figura 18. Comparación de los resultados del contenido de nitrógeno total de las nueve estaciones determinadas**

Según la NOM-021-SEMARNAT-2000 las estaciones 6 y 7 se clasifican como muy bajas en % N.T. y el resto como bajas.

Moreno, (1978) citado por Vazquez, (1999) menciona que los suelos menores a 0.032% N.T son extremadamente pobres, encontrándose aquí la estación 6 y los suelos entre 0.032 y 0.095% N.T. son pobres, lo que clasificó al resto de las estaciones. De esta manera las estaciones de muestreo carecen de uno de los nutrientes de mayor importancia en cuanto a la fertilidad de un suelo y por consiguiente para el desarrollo de los cultivos.

### 3.1.8. Resultados clasificación textural (% arena - % arcilla - % limo)

Con respecto a la clase textural los resultados en el porcentaje de arena variaron de 54.6% en la estación 5 a 83.88% en la estación 6, el promedio en el porcentaje de arena fue de 69.19%. En el porcentaje de arcilla el valor mínimo fue de 5.04% en la estación 8 y un valor máximo de 20.3 en la estación 1, con un promedio de 12.16%. El porcentaje de limo fue de 6% de la estación 6 a 34.36% de la estación 5, con una media de 18.64%. De acuerdo a estos resultados utilizando el triángulo de texturas de suelo propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA, (1954), se obtuvieron las clases texturales de cada suelo. En el Cuadro 19 se muestran los resultados, así como la clasificación de las nueve estaciones.

<b>Cuadro 19. Resultados Clase Textural</b>				
<b>E</b>	<b>%Arena</b>	<b>%Arcilla</b>	<b>%Limo</b>	<b>Clasificación Textural</b>
1	61.0	20.3	18.7	Franco
2	74.04	5.96	20.0	Franco arenosa
3	58.96	15.04	26.0	Franco
4	76.6	13.4	10.0	Franco arenosa
5	54.6	11.04	34.36	Franco
6	83.88	10.12	6.0	Franco arenosa
7	77.16	10.48	12.36	Franco arenosa
8	70.6	5.04	24.36	Franco arenosa
9	65.88	18.12	16.0	Franco arenosa
Prom	69.19	12.16	18.64	-----

Leitón, (1985), comenta que los suelos arenosos retienen poca humedad y los suelos arcillosos altas cantidades pero a tensiones altas, lo que limita la disponibilidad de agua para cultivo, por lo que para riego es preferible tener suelos francos. Esto indica que las 9 estaciones al entrar en la clase de suelos franco, como se observa en el Cuadro 19, tienen buena retención de humedad.

### 3.1.9. Resultados de fósforo extraíble

Los resultados obtenidos en el fósforo extraíble tuvieron un valor mínimo de 2.11 mg·kg<sup>-1</sup> en la estación 3 y un valor máximo de 334.01 mg·kg<sup>-1</sup> en la estación 4, ambos pertenecientes a Huilango. Se tuvo un promedio de 106.03 mg·kg<sup>-1</sup>. Los resultados se observan en el Cuadro 20. En la Figura 19 se encuentra la comparación de fósforo extraíble de las nueve estaciones.

Con la NOM-021-SEMARNAT-2000, el fósforo extraíble a excepción de la estación 3, se clasificó como alto en todos los suelos y bajo en la estación antes mencionada.

En el manual de interpretación de los análisis químicos de suelos, Etcheveres, (1977) cita a Moreno, (1970) que cataloga a los suelos menores a 4 mg·kg<sup>-1</sup> como pobres, y a los mayores de 12.5 mg·kg<sup>-1</sup> como ricos, donde la estación 3 se encuentra en el primer rango y las demás en el segundo.

<b>Cuadro 20. Resultados Fósforo Extraíble</b>	
<b>E</b>	<b>mg·kg<sup>-1</sup></b>
1	47.39
2	32.29
3	2.11
4	334.01
5	122.80
6	77.53
7	168.03
8	92.63
9	77.55
Prom	106.03

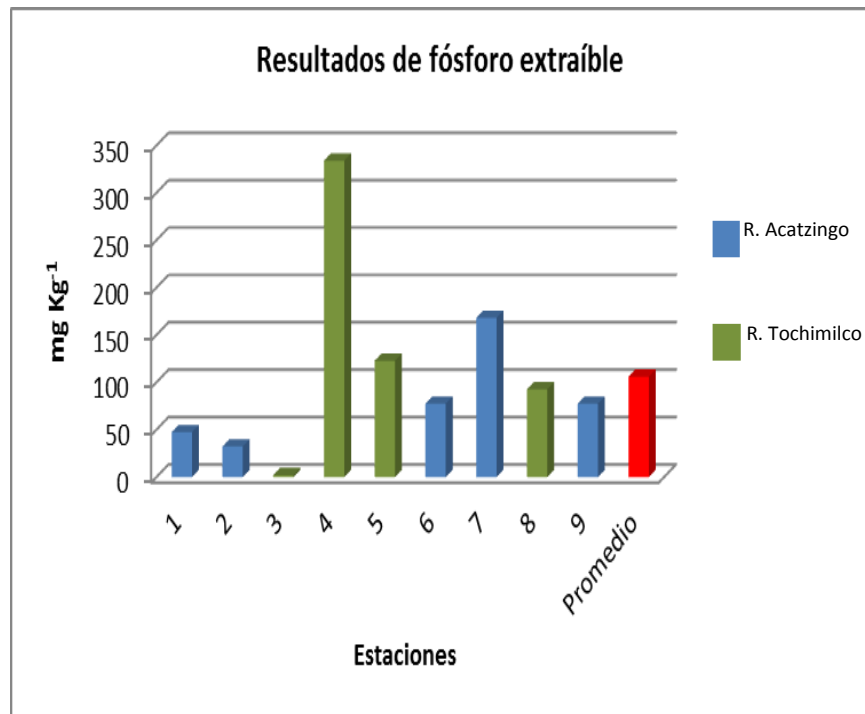


Figura 19. Comparación de los resultados de fósforo extraíble de las nueve estaciones determinadas

Según Navarro y Navarro, (2013) la mayor parte del fósforo presente en los suelos no es aprovechable por las plantas debido a su gran insolubilidad, ya que reacciona rápidamente con otros elementos químicos del suelo.

Adams, (1995), comenta que en suelos ácidos el P forma compuestos insolubles con Fe y Al, lo que indica que los altos valores de P que se encontraron en todas las estaciones, a excepción de la estación 3, son resultado de la baja disponibilidad de P del suelo para los cultivos.

3.1.10. Resultados capacidad de intercambio catiónico total (CICT)

En cuanto a la CIC varió entre 4.6 cmol·kg<sup>-1</sup> en la estación 7 correspondiente a San Juan Atenco y 10.50 cmol·kg<sup>-1</sup> en la estación 5 que pertenece a Huilango, con un promedio de 7.02 cmol·kg<sup>-1</sup>. Los resultados se observan en el Cuadro 21 y en la Figura 20 se encuentra la comparación de la CIC de las nueve estaciones.

De acuerdo con Cotteine, (1980) citado por Vázquez, (1999), las estaciones quedaron clasificadas como bajas, excepto la estación 7 que fue muy baja.

<b>Cuadro 21. Resultados de CICT</b>	
<b>E</b>	<b>cmol·kg<sup>-1</sup></b>
1	8.20
2	6.50
3	7.20
4	6.10
5	10.50
6	5.30
7	4.60
8	6.40
9	8.40
Prom	7.02

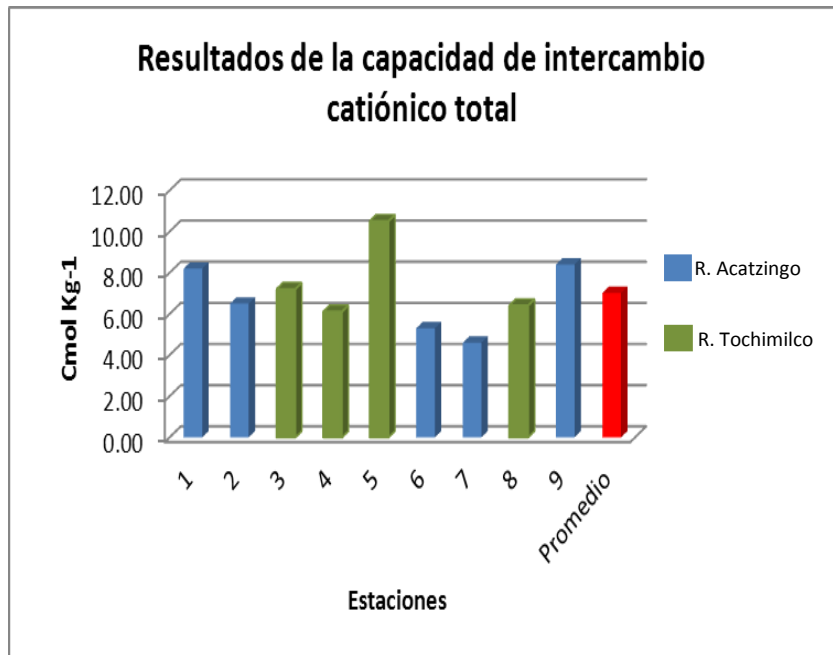


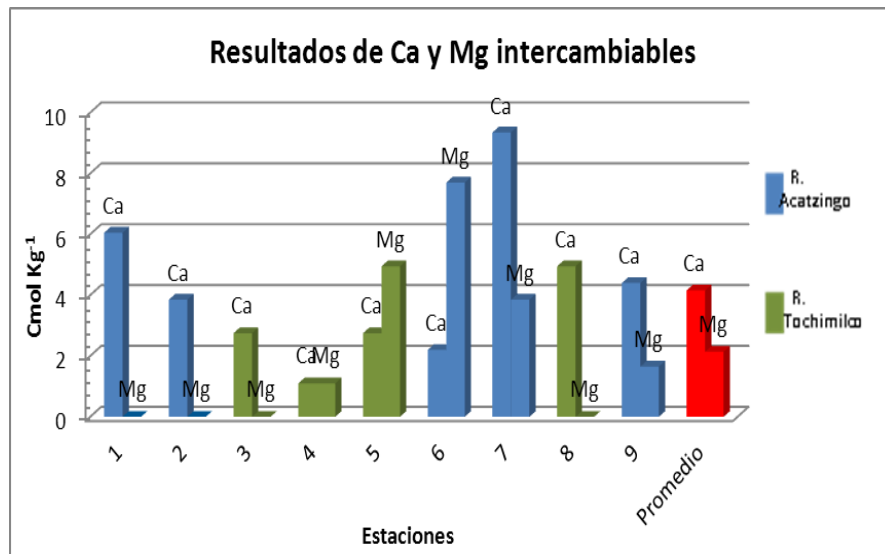
Figura 20. Comparación de los resultados de CICT de las nueve estaciones determinadas

En el manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo, Siebe, Jahn y Stahr, (1996) mencionan que la CIC depende de la cantidad de arcilla y materia orgánica presentes en el suelo, por lo que nuestros suelos al carecer de estas dos no presenta una alta CIC.

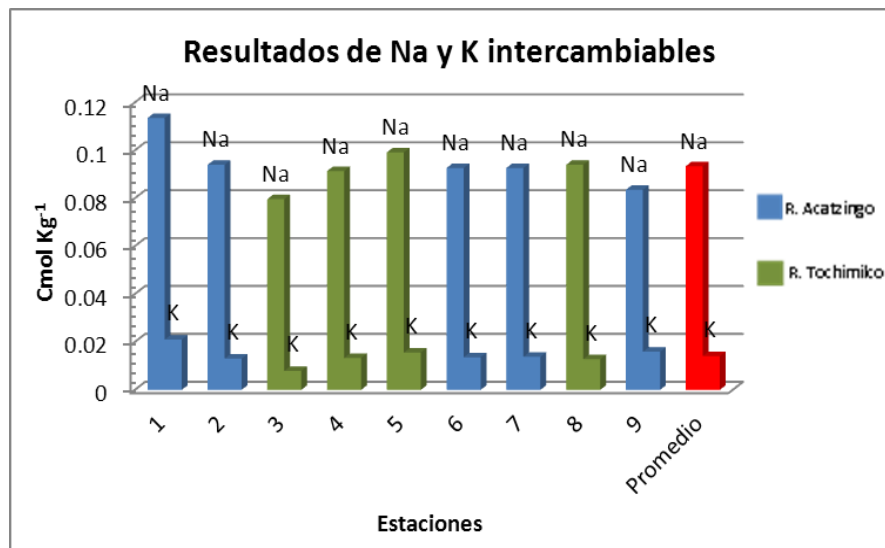
### 3.1.11. Resultados de cationes intercambiables (Ca, Mg, Na y K)

Los resultados de Ca intercambiable tuvieron valores de 1.099  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  a 9.348  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  con una media de 4.154  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Para Mg intercambiable los valores oscilaron entre 0 y 7.698  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  con un promedio de 2.138  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En los resultados de Na intercambiable se obtuvo un valor mínimo de 0.0796  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  y un valor máximo de 0.1135  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  con un valor medio de 0.0933  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En cuanto los valores de K intercambiable se obtuvieron un mínimo de 0.0079  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  y un máximo de 0.0210  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  con un promedio de 0.0141  $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ . En el Cuadro 22 se observan los resultados de los cationes intercambiables. En las Figuras 21 y 22 se comparan los resultados de Ca, Mg, Na y K intercambiables de las nueve estaciones.

<b>Cuadro 22. Resultados de Cationes Intercambiables</b>				
<b>E</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>
	<b><math>\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}</math></b>			
1	6.05	ND	0.1135	0.021
2	3.849	ND	0.0939	0.013
3	2.749	ND	0.0796	7.93E-03
4	1.099	1.099	0.0913	0.0133
5	2.749	4.948	0.0991	0.0156
6	2.199	7.698	0.0926	0.0136
7	9.348	3.849	0.0926	0.0138
8	4.949	0	0.0939	0.0128
9	4.399	1.649	0.0835	0.0159
Prom	4.154	2.138	0.0933	0.0141



**Figura 21. Comparación de los resultados de Ca y Mg intercambiables de las nueve estaciones determinadas**



**Figura 22. Comparación de los resultados de Na y K intercambiables de las nueve estaciones determinadas**

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 los resultados de Ca intercambiable en las estaciones 1 y 7 presentaron una clase media, las estaciones 2, 3 5, 6, 8 y 9 una clase baja y la estación 4 muy baja. En cuanto al Mg intercambiable las estaciones 5, 6 y 7 mostraron una clase alta, la estación 9 una clase media, la estación 4 una clase baja, la estación 8 una clase muy baja y el resto fueron no

determinadas. En el caso del K intercambiable todas las estaciones presentan una clase muy baja.

De esta manera la mayoría de cationes intercambiables presentes en las estaciones se encontraron con bajas concentraciones, con algunas excepciones en el Mg, observando cómo afecta a las bases intercambiables un pH ácido.

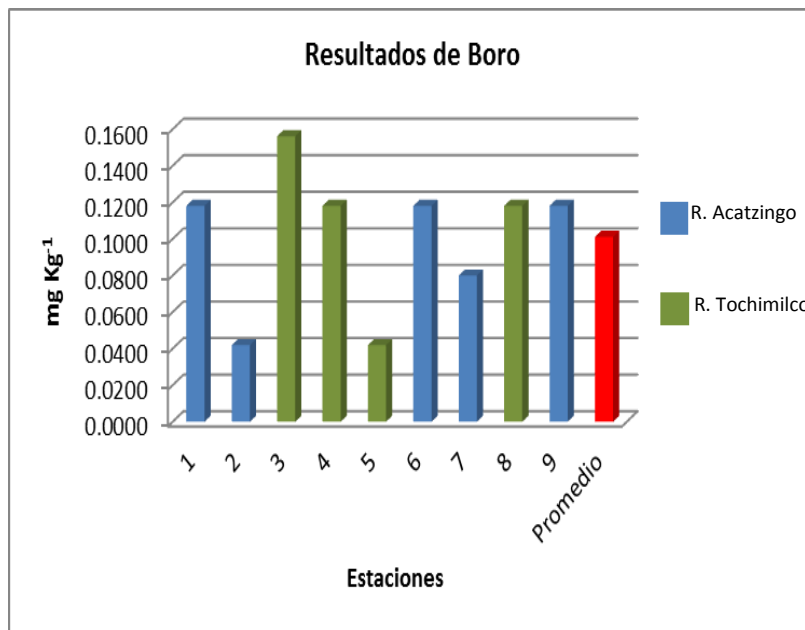
Rioja, (2002), comentó que al obtener resultados menores a  $0.3 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$  en las concentraciones de Na, se cuenta con suelos con muy bajo contenido del mismo, lo que implica que no existe un problema de sodicidad en las estaciones que genere un bajo rendimiento en los cultivos y ningún cambio en las propiedades físicas ni químicas ocasionadas por este elemento.

#### 3.1.12. Resultados de boro (B)

En contenido de boro se obtuvieron valores de  $0.0419 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  a  $0.1562 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  con una media de  $0.1012 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El valor mínimo se encontró en las estaciones 2 y 5 pertenecientes a San Sebastián Teteles y Huilango respectivamente, y el valor máximo fue de la estación 3 de Huilango. En el Cuadro 23 se muestran los resultados de esta determinación y en la Figura 23 las comparaciones de las nueve estaciones.

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 los resultados en todas las estaciones se clasifican como muy bajas en contenido de boro.

Cuadro 23. Resultados de Boro	
E	mg·kg <sup>-1</sup>
1	0.1181
2	0.0419
3	0.1562
4	0.1181
5	0.0419
6	0.1181
7	0.0800
8	0.1181
9	0.1181
Prom	0.1012



**Figura 23. Comparación de los resultados de boro de las nueve estaciones determinadas**

Thompson y Troeh, (1998), nos dice que las regiones húmedas presentan pérdidas de boro por lavado al igual que en suelos más ácidos, manifestando una necesidad de boro como fertilizante, así podemos observar el por que las estaciones presentan un bajo contenido de B.

### 3.1.13. Micronutrientes (Fe, Mn, Zn) y metales pesados (Cd, Ni)

Los resultados de Fe tienen un valor mínimo de 1.832 mg·kg<sup>-1</sup> y un valor máximo de 20.035 mg·kg<sup>-1</sup> con un promedio de 9.349 mg·kg<sup>-1</sup>. Para Mn los valores obtenidos van de 4.120 a 28.226 mg·kg<sup>-1</sup> con una media de 12.629 mg·kg<sup>-1</sup>. En cuanto a Zn el valor mínimo fue de 0.129 mg·kg<sup>-1</sup> y el valor máximo de 0.427 mg·kg<sup>-1</sup> con un valor medio de 0.299 mg·kg<sup>-1</sup>. Los resultados de Cd oscilaron de 0.007 a 0.021 mg·kg<sup>-1</sup> con un promedio de 0.015 mg·kg<sup>-1</sup>. Los valores de Ni variaron desde 0 hasta 1.693 mg·kg<sup>-1</sup> con una media 0.478 mg·kg<sup>-1</sup>. En el Cuadro 24 se muestran los resultados de los micronutrientes y los metales pesados.

<b>Cuadro 24. Resultados micronutrientes y metales pesados</b>					
<b>E</b>	<b>Micronutrientes</b>			<b>Metales pesados</b>	
	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>	<b>Ni</b>
	<b>mg·kg<sup>-1</sup></b>				
1	1.919	4.548	0.372	0.020	0.431
2	1.832	4.992	0.394	0.017	0.468
3	6.442	18.259	0.285	0.016	0.553
4	15.368	7.816	0.306	0.017	0.308
5	11.426	24.351	0.179	0.021	1.693
6	6.934	4.120	0.129	0.013	ND
7	12.932	8.128	0.351	0.012	ND
8	20.035	13.218	0.427	0.007	ND
9	7.252	28.226	0.251	0.011	0.852
Prom	9.349	12.629	0.299	0.015	0.478

En cuanto a micronutrientes la NOM-021-SEMARNAT-2000 clasifica los valores de Fe como deficientes cuando son menores a 2.5 mg·kg<sup>-1</sup>, lo cual se observa en las estaciones 1 y 2, y como adecuados a los valores mayores a 4.5 mg·kg<sup>-1</sup> que son el resto de las estaciones. Para Mn todas las estaciones son adecuadas ya que presentan valores mayores a 1 mg·kg<sup>-1</sup>. Y para Zn los valores menores a 0.5 mg·kg<sup>-1</sup> son deficientes, esto se presenta en todas nuestras estaciones.

Para metales pesados o elementos tóxicos de acuerdo a la norma ninguno de los metales analizados sobrepasa la tolerancia de los cultivos, ya que el nivel normal de Cd es de 0.35 mg·kg<sup>-1</sup> y en el Ni es de 50 mg·kg<sup>-1</sup> y nuestras estaciones están muy por debajo de esos valores.

Moreno, (1970) citado por Etcheveres, (1977) en su manual de interpretación de análisis químicos de suelo menciona que el rango común de concentración normal para el Fe es de 10 a 1000 ppm, las estaciones que se encuentran en este rango

son la 4, 5, 7 y 8. Para el Mn va de 2 a 500 ppm y todas las estaciones entran en este rango. En cuanto al Zn maneja valores de 1 a 100 ppm, y como se observa en el Cuadro 24 ninguna de las estaciones entra en estos valores ya que son menores a  $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

De acuerdo a Ankerman y Large, citado por Vázquez, (1999) en cuanto al Fe las estaciones 1 y 2 son muy bajas por tener valores menores a  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , las estaciones 3, 6, 9 son bajas por oscilar entre 5 a  $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , las estaciones 4, 5 y 7 son medias con valores entre 10 a  $16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , y la estación 8 es alta por estar entre los valores de 16 a  $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Para Mn las estaciones 1, 2 y 6 son menores a  $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y se clasificaron como muy bajas, las estaciones 4, 7 y 8 estuvieron entre 5 a  $14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y son bajas, y las estaciones 3, 5 y 9 se entraron en el rango de 14 a  $29 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  lo que las clasifica en medio.

Fassbender, (1987) citado por Vázquez, (1999) en su cuadro del contenido total de elementos menores en suelos maneja una media aproximada de  $0.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  para Cd y un rango común de 0.01 a  $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , lo cual indica que las nueve estaciones se encuentran dentro de este rango. Para Ni una media aproximada de  $50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y un rango común de 2 a  $750 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , ninguna de las nueve estaciones llegan al mínimo del rango común.

De acuerdo a Vázquez, (1999) los valores de Cd en las nueve estaciones no entraron en el rango de concentración normal que va de 0.1 a  $1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y no rebasan el nivel permisible de  $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . El Ni tampoco estuvo dentro del rango de concentración normal que es de 2 a  $30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  y no sobrepasa el nivel permisible que es de  $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

### 3.2. RESULTADOS POR REGIONES

A continuación se presentan los resultados de cada región para interpretar sus fertilidades. En los Cuadros 25 y 26 se presentan los resultados físicos y químicos, respectivamente, de la región de Acatzingo y en los Cuadros 27 y 28 los resultados físicos y químicos de la región de Tochimilco, respectivamente.

Cuadro 25. Resultados físicos de los parámetros de los suelos de la región de Acatzingo									
E	pH	Densidad g·mL <sup>-1</sup>		Porosidad	Textura %				Humedad
		Aparente	Real	%	Arena	Arcilla	Limo	Clase Textural	%
1	6.8	1.19	2.56	53.52	61	20.3	18.7	Franco	2.98
2	5.8	1.31	2.31	43.29	74.04	5.96	20	Franco arenosa	2.1
6	6.1	1.4	2.74	48.91	83.88	10.12	6	Franco arenosa	1.45
7	5.7	1.44	2.54	43.31	77.16	10.48	12.36	Franco arenosa	1.04
9	6.1	1.27	2.55	50.20	65.88	18.12	16	Franco arenosa	3.91
Prom.	6.1	1.32	2.54	47.85	72.39	12.99	14.61	Franco arenosa	2.30

Cuadro 26. Resultados químicos de los parámetros de los suelos de la región de Acatzingo														
E	M.O	N	P	Cationes Intercambiables cmol kg <sup>-1</sup>				CICT	B	Micronutrientes mg·kg <sup>-1</sup>			Metales pesados mg·kg <sup>-1</sup>	
	%	%	mg·kg <sup>-1</sup>	Ca	Mg	Na	K	cmol·kg <sup>-1</sup>	mg·kg <sup>-1</sup>	Fe	Mn	Zn	Cd	Ni
1	1.02	0.08	47.39	12.10	ND	0.114	0.021	8.20	0.118	1.919	4.548	0.372	0.020	0.431
2	0.8	0.05	32.29	7.698	ND	0.094	0.013	6.50	0.042	1.832	4.992	0.394	0.017	0.468
6	0.44	0.03	77.53	4.399	15.395	0.093	0.014	5.30	0.118	6.934	4.120	0.129	0.013	ND
7	0.8	0.04	168.03	18.696	7.698	0.093	0.014	4.60	0.080	12.932	8.128	0.351	0.012	ND
9	0.9	0.07	77.55	8.799	3.299	0.084	0.016	8.40	0.118	7.252	28.226	0.251	0.011	0.852
Prom	0.8	0.05	80.56	10.338	5.278	0.095	0.016	6.60	0.095	6.173	10	0.299	0.015	0.350

<b>Cuadro 27. Resultados físicos de los suelos de la región de Tochimilco</b>									
<b>E</b>	<b>pH</b>	<b>Densidad g·mL<sup>-1</sup></b>		<b>Porosidad</b>	<b>Textura %</b>				<b>Humedad</b>
		<b>Aparente</b>	<b>Real</b>	<b>%</b>	<b>Arena</b>	<b>Arcilla</b>	<b>Limo</b>	<b>Clase Textural</b>	<b>%</b>
3	5.2	1.2	2.55	52.94	58.96	15.04	26	Franco	2.99
4	4.6	1.38	2.61	47.13	76.6	13.4	10	Franco arenosa	1.3
5	5.4	1.23	2.75	55.27	54.6	11.04	34.36	Franco	3.24
8	5.2	1.38	2.55	45.88	70.6	5.04	24.36	Franco arenosa	2.68
Prom	5.1	1.30	2.62	50.31	65.2	11.13	23.70	Franco arenosa	2.55

<b>Cuadro 28. Resultados químicos de los suelos de la región de Tochimilco</b>														
<b>E</b>	<b>M.O</b>	<b>N</b>	<b>P</b>	<b>Cationes Intercambiables</b>				<b>CICT</b>	<b>B</b>	<b>Micronutrientes</b>			<b>Metales pesados</b>	
	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>mg·kg<sup>-1</sup></b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>	<b>cmol·kg<sup>-1</sup></b>	<b>mg·kg<sup>-1</sup></b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>	<b>Ni</b>
3	0.93	0.05	2.11	5.498	ND	0.080	0.008	7.20	0.156	6.442	18.259	0.285	0.016	0.553
4	1.16	0.06	334.01	2.199	2.199	0.091	0.013	6.10	0.118	15.368	7.816	0.306	0.017	0.308
5	1.21	0.08	122.8	5.498	8.897	0.099	0.016	10.50	0.042	11.426	24.351	0.179	0.021	1.693
8	2.37	0.05	92.63	9.898	0	0.094	0.013	6.40	0.118	20.035	13.218	0.427	0.007	ND
Prom	1.42	0.06	137.88	5.773	2.774	0.091	0.013	7.55	0.11	13.328	15.911	0.300	0.015	0.640

Comparando entre las 2 regiones con el fin de establecer cuál es más fértil se utilizaron los promedios de cada determinación correspondientes a cada región por lo que para pH la región de Acatzingo presentó una media de 6.1 que hace al suelo más adecuado para la agricultura que a la región de Tochimilco con un valor de 5.2. Para la densidad aparente ambas regiones cuentan con suelos francosos, el porcentaje de porosidad se clasificó como alto para la región de Tochimilco con 50.31% y como medio en la región de Acatzingo con 47.85%; la clasificación textural resultó franco arenosa para las 2 regiones. En cuanto a M.O. la región de Tochimilco obtuvo un valor de 1.42%, casi el doble que la región de Acatzingo con un valor de 0.8% aunque ambas se clasificaron como muy pobres en M.O.; el %N fue de 0.05% para la región de Acatzingo y de 0.06% para la región de Tochimilco catalogando a ambas regiones como bajas en nitrógeno. El suelo en las 2 regiones presentó una alta concentración de P, 80.56 mg·kg<sup>-1</sup> en la región de Acatzingo y 137.88 mg·kg<sup>-1</sup> en la región de Tochimilco, teniendo el segundo una concentración mucho mayor que el primero, la cual ligando con el pH más ácido parece indicar la precipitación del fósforo por Al, haciéndolo insoluble y no aprovechable para las plantas. El Al es comprobable por los cationes intercambiables de Ca, Mg, Na y K que se presentan en mayor cantidad en la región de Acatzingo (10.338, 5.278, 0.095 y 0.016 cmol·kg<sup>-1</sup>, respectivamente) que en la región de Tochimilco (5.773, 2.774, 0.091 y 0.013 cmol·kg<sup>-1</sup>, respectivamente), debido al acercamiento a un pH neutro ya que estos cationes están en mayor disposición a pH más altos, y al presentar la región de Tochimilco una CIC mayor que la de la región de Acatzingo (7.75 y 6.60%, respectivamente), obtenemos que la diferencia entre la CIC y las concentraciones de Ca, Mg, Na y K intercambiables corresponden a las concentraciones de los cationes de Al<sup>3+</sup> y de H<sup>+</sup>. Para B, Fe, Mn y Zn, la región de Tochimilco tuvo concentraciones mayores que en la región de Acatzingo, pero en ambas el B fue muy bajo, el Fe adecuado, el Mn adecuado y el Zn deficiente. En cuanto a metales pesados las dos regiones obtuvieron valores demasiado bajos a comparación de los presentados en la norma como normales.

## **CONCLUSIONES**

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación mediante el análisis de las muestras de suelo de las regiones de Acatzingo y Tochimilco, Puebla y su posterior interpretación para determinar la fertilidad en base a la NOM-021-SEMARNAT-2000, se llegó a las siguientes conclusiones:

El suelo de la región de Acatzingo tuvo baja fertilidad debido a la intensificación de la producción agrícola mediante el cultivo de algunas hortalizas y de nopal, por lo que la primera hipótesis planteada al inicio de esta investigación es aceptada, si bien esta región aun es productiva, se debe controlar la intensificación agrícola y remediar los suelos para que en un futuro esta región no se vuelva infértil.

El suelo en la región de Tochimilco tuvo baja fertilidad debido a la erosión eólica e hídrica por los escurrimientos, por lo que la segunda hipótesis planteada al inicio de esta investigación es aceptada, y aunque los suelos de esta región siguen produciendo y no se pueden controlar las variables geográficas y climáticas, se debe mejorar la calidad de los suelos para evitar una infertilidad en años posteriores.

La fertilidad en la región de Acatzingo presentó características físicas útiles para la fertilidad pero no adecuadas debido a sus valores bajos y características químicas en donde el único macronutriente presente en alta cantidad fue el P, ya que el N y el K escasearon en los suelos; en elementos secundarios el Ca y Mg se encontraron restringidos para los cultivos debido al pH ligeramente ácido; y en micronutrientes el Fe estuvo limitado, el Mn fue adecuado y el Zn y B fueron deficientes, características que describen una baja fertilidad.

La fertilidad en la región de Tochimilco mostró características físicas no lo suficientemente buenas para describir un suelo fértil pero útiles para la producción de cultivos, y propiedades químicas donde el N y el K fueron deficientes mientras que el P se encontró en gran proporción; el Ca y el Mg fueron menores a lo requerido por los cultivos influenciados por un pH moderadamente ácido; en

cuanto al Fe y Mn se obtuvieron cantidades adecuadas y para Zn y B muy reducidas, características que refirieron una baja fertilidad.

La región de Tochimilco presentó una mayor fertilidad que la región de Acatzingo al tener una mejor clasificación en cuanto a sus características físicas y químicas que describieron su fertilidad.

A pesar de que las concentraciones de metales pesados en la región de Tochimilco fueron muy bajas, logrando una de las condiciones que se necesita para producir maíz orgánico, tal aprobación requiere, de acuerdo con la Ley de productos orgánicos que los agricultores cumplan con los demás requisitos que maneja esta ley para poder adquirir la certificación que otorga el SENASICA. Los suelos tuvieron una baja fertilidad y necesitan de un plan de remediación de suelos con el cual se logre producir cultivos de buena calidad y de manera sustentable, además de un chequeo regular de las condiciones de la producción, que incluyen el análisis de suelo, de agua de riego, del cultivo y la elección de fertilizantes que no contengan sustancias químicas.

## RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos de esta investigación es necesario que el pH de los suelos se encuentre en un rango de neutralidad, por lo que los agricultores pueden recurrir al encalado con el fin de mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos ya que aporta Ca y Mg y otros nutrientes minerales, mejora la fijación del N, influye en la disponibilidad de nutrientes para la planta y reduce la toxicidad de algunos elementos minerales, ya que los mecanismos de reacción de los materiales de encalado permiten la neutralización de los iones  $H^+$  en la solución del suelo por medio de los iones  $OH^-$  producidos al entrar estos materiales en contacto con el agua del suelo, además promueve el crecimiento de los cultivos e incrementa la absorción de agua, lo cual ayuda a proteger al suelo del viento y de la erosión hídrica. A pesar de que los óxidos e hidróxidos sean más efectivos para la neutralización son difíciles de

manejar y por esta razón los carbonatos son los materiales de encalado de mayor uso en la agricultura. El encalado debe de realizarse antes del establecimiento del cultivo por lo que la aplicación debe ser durante el otoño ya que tendrá suficiente tiempo para reaccionar con la humedad del suelo y reducir la acidez antes de la siembra de los cultivos. Es importante recordar que se debe de hacer de una manera controlada debido a que el sobreencalado puede tener efectos perjudiciales sobre el crecimiento de los cultivos.

Los suelos tienen una gran deficiencia de N y K lo cual se puede remediar con la aplicación de biofertilizantes y abonos orgánicos que eleven los niveles de estos nutrimentos y mejoren las características del suelo.

El empleo de microorganismos capaces de mantener o incrementar los niveles de producción de los cultivos (microorganismos promotores del crecimiento vegetal), es decir los biofertilizantes, son una buena opción para los suelos, debido a que optimizan la asimilación de los nutrientes presentes del suelo siendo innecesario utilizar fertilizantes químicos. Los biofertilizantes a base de bacterias solubilizadoras de fosfatos son de gran utilidad debido a que los suelos cuentan con altos contenidos de fósforo que no son utilizados a causa de su insolubilidad por su pH ácido, al igual que los biofertilizantes a base de bacterias fijadoras de nitrógeno, como lo es la Azobacter, debido a la escases de este en los suelos.

Para contrarrestar el déficit de K se pueden utilizar algunos productos permitidos para la producción orgánica, pero no todos son viables debido al costo del material, transporte y aplicación, es por esto que se recomienda utilizar aquellos de fácil obtención como lo son las cenizas de madera, que es un material alcalino y tiene un efecto neutralizante entre 80 y 90% del valor neutralizante de la cal comercial, estas no deben de contener pinturas o esmaltes, son una solución natural anti plagas y enfermedades causadas por hongos, aportan altos niveles de Ca, Mg y K y mejoran el funcionamiento de las bacterias que fijan N. Se debe aplicar durante la preparación del suelo de modo que se mezcle uniformemente para que pueda ser aprovechado por las raíces de las plantas. Otros productos que se pueden utilizar son el estiércol y la composta, en donde el K se encuentra

mayormente en formas disponibles para las plantas, de manera similar a las fuentes inorgánicas aprobadas. Las repetidas aplicaciones de altas cantidades de residuos de corral pueden resultar en la acumulación de K en el suelo, lo que podría promover el consumo óptimo del K por la planta (Mikkelsen, 2008).

También es necesario dejar recuperar al suelo de manera natural sus propiedades físicas y químicas lo cual contribuirá al mejor aprovechamiento de las recomendaciones antes mencionadas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adams, M. (1995). *Fundamentos de Química del suelo*. Caracas, Venezuela: Anauco Ediciones C.A.
- Albani E., A., Pascual R., R., y Cruz R., L. (2012). *Reporte del clima en México*. . México: servicio meteorológico nacional.
- Almorox, A., López Bermudez, F., y Rafaelli, S. (2010). *La degradación de los suelos por erosión hídrica: métodos de estimación*. Murcia, España: Murcia: Universidad de Murcia.
- Arias Jiménez, A. C. (2001). *Suelos Topicales*. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Bautista Zuñiga, F. (1999). *Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados*. Yucatán, México: Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- Bear , F. (1958). *Suelos y fertilizantes* (4a ed.). España: Ediciones Omega S.A.
- Black, C. (1973). *Methods of Soil Analysis Agronomy No. 9*. Ed. American Society of Agronomy Inc. USA.
- Casanova, E. (2005). *Introducción a la ciencia del suelo* (Segunda ed.). Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico.
- Chiossi, N. (1975). *Geología aplicada a Engenharia*. Sao Paulo: Gremio Politecnico.
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones* (Quinta ed.). México: Limusa.
- D.O.F. (2000). NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. estudio, muestreo y análisis.
- Dalzell, H., Biddlestone, A. J., y Thurairajan, G. K. (1991). *Manejo del suelo: Producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales*. FAO, Servicio de Recursos, Manejo y conservación de suelo. Dirección de fomento de tierras y agua.

- De Santana, C. J. (1991). *Tesis: Formas totales y disponibles de zinc, cobre, Manganeso, Hierro y Molibdeno en suelos de la región Cacaotera de Bahía, Brasil*. Turrialba, Costa Rica: Instituto Interamericano de ciencias Agrícolas.
- Del Valle, M., y Solleiro, J. L. (1996). *El cambio tecnológico en la agricultura y las agroindustrias en México*. México: Siglo xxi editores.
- Doménech, X., y Peral, J. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres*. Barcelona, España: Editorial Reverté.
- Domínguez R., V. I. y Aguilera H., N. (1984). *Metodología de Analisis Fisico-Químicos de Suelos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de ciencias. Biología.
- En Calva, J. L. (2007). Desarrollo agropecuario, forestal y pesquero: Agenda para el desarrollo. En L. Jiménez Sánchez, *Principales modalidades de la agricultura en México: antecedentes y perspectivas* (Vol. 9, págs. 55-75). D.F, México: Miguel Angel Porrúa.
- Espinosa Cortés, L. M. (1999). *Sector agropecuario y alternativas comunitarias de seguridad alimentaria y nutrición en México*. D.F, México: Plaza y Valdés Editores.
- Etcheveres, J. (1977). *Interpretación de los analisis químicos del suelo*. México: Colegio de Posgraduados.
- Etcheveres, J. D., y Espinoza, G. (1971). *Manual de fertilidad y fertilizantes*. Chile: Universidad de Concepción.
- FAO/PNUMA. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma, Italia: Organización de las naciones unidas para la agricultura y alimentación.
- FAO/PNUMA. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma, Italia: Organización de las naciones unidas para la agricultura y aimentación.
- Flores del Moral , E. (1995). *Dinámica micronutricional temporal del suelo (Fe, Zn y Mn) durante un ciclo vegetativo del cultivo de maíz en la región de*

- Teziutlán, Puebla*. Puebla, México: Benemèrita Universidad Autónoma de Puebla.
- Flores Delgadillo, L., y Alcalá Martínez, J. R. (2010). *Manual de procedimientos analíticos*. México: Universidad Nacional autónoma de México.
- Foth H., D., y Turk L., M. (1981). *Fundamentos de la ciencia del suelo* (5 ed.). D.F, México: CIA Editorial continental S.A DE C.V México.
- Fuentes López, H. M. (1993). *Diagnóstico de la fertilidad del suelo y niveles nutrimentales del cultivo de maíz en el Estado de Puebla*. Puebla, México: Benemèrita Universidad Autónoma de Puebla.
- Graetz, H. (1992). *Suelos y Fertilización* (2 ed.). México: Trillas: SEP.
- Hudson, N. (2006). *Conservación del suelo*. España: Reverté.
- INEGI. (2011). *Panorama Sociodemográfico de México*.
- INEGI. (2013). *Anuario de estadísticas por entidad federativa 2012*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- Kass L., D. (1996). *Fertilidad en suelos*. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Lafuente, D. A. (2001). *Avances en seguridad alimentaria*. (M. Velázquez, Ed.) Vigo, España: Altaga.
- Leitón Soubannier, J. S. (1985). *Riego y drenaje*. San José, Costa Rica: Universidad estatal a distancia.
- Maderey, R. L. (2005). *Geografía para el siglo XXI: Principios de hidrogeografía. Estudio del ciclo hidrológico*. México: Textos Universitarios.
- Malavolta, E., y Moraes, M. (2007). Nickel-from toxic to essential nutrient. Better Crops with plant food. 91(3).
- Moreno Reséndez, A. (2007). *Elementos nutritivos. Asimilación, funciones, toxicidad e indisponibilidad en los suelos*. (primera ed.). México: Libros en Red.
- Mosca, T. (2006). *Física para la ciencia y la tecnología* (Quinta ed.). España: REVERTÉ.

- Navarro Blaya, S., y Navarro Garcia, G. (2013). *Química Agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida* (3a ed.). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Núñez Solís, J. (2000). *Fundamentos de Edafología* (Tercera ed.). San José, Costa Rica: Editorial EUNED.
- Núñez Solís, J. (2001). *Manejo y conservación de suelos*. Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia.
- Olalla Mañas, F. M. (2000). *Agricultura y desertificación*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Oliveira Prendes, J. A., Afif Hourri, E., & Mayor López, M. (2006). *Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado*. Asturias, España: Universitarios Ediuño.
- Porta, J., López Acevedo, M., y Roquero, C. (2003). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente* (3 ed.). Barcelona, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Raeburn, J. (1987). *Agricultura: bases, principios y desarrollo*. España: Reverte.
- Rico Rodríguez, A., y Del Castillo, H. (2001). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas* (Vol. 1). México: Limusa.
- Rioja Molina, A. (2002). *Apuntes de Fitotecnia general*. Ciudad Real, España: E.U.I.T.A.
- Rodríguez Barreira, S. (2008). *Tesis de doctorado: Crecimiento del arbolado, producción de pasto y efectos edáficos en sistemas silvopastorales fertilizados con lodos de depuradora, efecto residual*. España: Universidad de Santiago de Compostela.
- Rodríguez Suppo, F. (1991). *Fertilizantes: Nutrición vegetal*. México: A.G.T. Editor.
- SAGARPA. (2007). *Programa sectorial de desarrollo agropecuario y pesquero 2007-2012*.
- Sánchez García, M., y Pérez Román, V. J. (2014). *Calidad de la agua de riego y su influencia en la salinidad de los suelos del distrito de riego 030 "Valsequillo"*. Puebla: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

- Seoáñez Calvo, M. (1999). *Contaminación del suelo: estudios, tratamiento y gestión. Colección de ingeniería del medio ambiente*. España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Siebe, C., Jahn, R., y Stahr, K. (1996). *Manual para la descripción y evaluación de suelos en el campo*. México: Instituto de geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Simón Benitez, M. (1991). *Dinámica macronutricional (N, P, K, Ca, Mg y S) del suelo durante el desarrollo del cultivo de maíz en la región de Teziutlan, Sierra Norte del Estado de Puebla*. Puebla, México: Benmérica Universidad Autónoma de Puebla.
- Smith, D. H., Sims, B. G., y O'Neil, D. H. (1994). *Principios y prácticas de prueba y evaluación de maquinas y equipos agrícolas*. Boletín de servicios agrícolas de la FAO 110, Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimetación, Roma.
- Stanley, E. M. (2007). *Introducción a la química ambiental*. D.F, México: Editorial Reverté.
- Taiz, L., y Zeiger, E. (2006). *Fisiología Vegetal* (3a ed., Vol. Vol 1). España: Publicaciones de la Universidad Jaume I.
- Thompson, L., y Troeh, F. (1998). *Los suelos y su fertilidad*. España: Reverté.
- Tisdale, S., y Nelson, W. (1970). *Fertilidad de los suelos y fertilizantes* (segunda ed.). España: Montaner y Simon.
- Tschebotarioff, G. P. (1979). *Foundations: Retaining and Earth Stuctures: the Art of Design and Construction and its Scientific Basis in Soil Mechanics*. McGraw-Hill.
- Valderrama, J. (1997). *Información tecnologica*. La Serena, Chile: Centro de información tecnologica.
- Vazquez Alarcón, A. (1999). *Guía para interpretar el analisis químico de agua y suelo* (2a ed.). México: Universidad Autonoma de Chapingo.
- Vázquez, M., Gómez, C., y Lugo, C. (2004). *Historia de México: Dela época prehispánica a la actualidad*. México: Limusa.

- Villalobos, F., Mateos, L., Orgaz, F., y Fereres, E. (2009). *Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola* (2a ed.). España: Ediciones Mundiprensa.
- Whiting, D., Wilson, C., y Card, A. (2011). Managing soil tilth: Texture, structure and pore space. *Colorado Master Gardener*, 7(722).
- Wild, A. (1992). *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel*. Madrid, España: Ediciones Mundi-prensa.
- Yassoglou, N. J. (1987). *The production potential of soils: part II - Sensitivity of the soil systems in southern Europe to degrading influxes*.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- Améndola, R., Castillo, E., y Martínez, P. (2005). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Recuperado el 13 de 02 de 2014, de FAO:  
[http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/counprof/spanishtrad/Mexico\\_sp/Mexico\\_sp.htm#2.SOILS](http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/counprof/spanishtrad/Mexico_sp/Mexico_sp.htm#2.SOILS)
- e-local*. (2011). Recuperado el 13 de 02 de 2014, de <http://www.elocal.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM21puebla/municipios/21004a.html>
- e-local*. (2011). Recuperado el 13 de 02 de 2014, de <http://www.elocal.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM21puebla/municipios/21188a.html>
- FAO. (1993). *Depósito de documentos de la FAO*. Recuperado el 28 de 01 de 2014, de <http://www.fao.org/docrep/t0395s/t0395s00.htm>
- Foro-México. (08 de 06 de 2005). *Foro-México.com*. Recuperado el 28 de 07 de 2013, de <http://www.foro-mexico.com/puebla/san-francisco-huilango/mensaje-244647.html>
- Huerta, C. (27 de Enero de 2012). *AGRONOMIA PARA TODOS*. Recuperado el 11 de Octubre de 2014, de <http://www.agronomiaparatodos.org/2012/01/el-zinc-en-suelos-y-cultivos-agricolas.html>

- Lugo-Morin, D. R. (2013). *SciELO México*. (COLPOS-México, Ed.) Recuperado el Diciembre de 2014, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212013000200003&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-84212013000200003&script=sci_arttext)
- Martínez, N. (29 de 09 de 2010). *CNN México*. Recuperado el 12 de 2013, de <http://mexico.cnn.com/salud/2010/09/29/el-maiz-pilar-de-la-alimentacion-mundial>
- Mikkelsen, R. (2008). Manejo del potasio para la producción de cultivos orgánicos. Recuperado el 06 de 03 de 2015, de [http://www.ipni.net/publication/ialahp.nsf/0/99E778DE1879908C852579A0006B194B/\\$FILE/Manejo%20del%20Potasio%20para%20la%20Producci%C3%B3n%20de%20Cultivos%20Org%C3%A1nicos.pdf](http://www.ipni.net/publication/ialahp.nsf/0/99E778DE1879908C852579A0006B194B/$FILE/Manejo%20del%20Potasio%20para%20la%20Producci%C3%B3n%20de%20Cultivos%20Org%C3%A1nicos.pdf)
- PRO-ORGÁNICO. (2014). Recuperado el Diciembre de 2014, de <http://www.pro-organico.com/Preguntas-frecuentes.aspx>
- Ramírez Valverde, B., Ramírez Valverde, G., & Juárez Sanchez, P. (1995). *AgriNet*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2014, de <http://agrinet.tamu.edu/trade/papers/compite.pdf>
- SENASICA. (2014). *Servicio Nacional de Sanidad Inocuidad y Calidad Agroalimentaria*. Recuperado el 01 de 2015, de <http://senasica.gob.mx/default.asp?id=6171>

