



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUATUSCO

DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN UN PERFIL DE SUELO CON FLUCTUACIÓN DE NIVEL FREÁTICO BAJO FERTIRRIEGO

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERIA AMBIENTAL

PRESENTA:

ESTEFANIA PÉREZ VARGAS

DIRECTOR DEL TRABAJO RECEPCIONAL:

DR. SALVADOR PARTIDA SEDAS

DR. JOEL PINEDA PINEDA

Huatusco, ver.

Diciembre de 2019.



INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE HUATUSCO

DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN UN PERFIL DE SUELO CON FLUCTUACIÓN DE NIVEL FREÁTICO BAJO FERTIRRIEGO

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTA:

ESTEFANIA PÉREZ VARGAS

DIRECTOR DEL TRABAJO RECEPCIONAL:

DR. SALVADOR PARTIDA SEDAS

DR. JOEL PINEDA PINEDA

Huatusco, ver.

Diciembre de 2019.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



VERACRUZ
GOBIERNO
DEL ESTADO



SEV
Secretaría
de Educación



DET
Dirección de Educación
Tecnológica



Huatusco, Ver., a 10 de Diciembre de 2019.

C. ESTEFANIA PÉREZ VARGAS
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERIA AMBIENTAL
P R E S E N T E.

En relación a su solicitud relativa, me es grato transcribir a usted a continuación que después de haber sido analizado exhaustivamente el (la) **Tesis** titulada:

**“DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN UN PERFIL DE SUELO CON
FLUCTUACIÓN DE NIVEL FREÁTICO BAJO FERTIRRIEGO”**

Se le notifica que a mi juicio este cumple con los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes de la **Tesis**, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE.

M.M. VÍCTOR MANUEL ARCOS FERIA
DIRECTOR DEL ITSH.

SEP

SEV



INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR DE HUATUSCO
CLAVE 30EIT0013Z
DIRECCION GENERAL



Av. 25 Poniente Num. 100 Col. Reserva Territorial
Huatusco, Veracruz, México. C.P. 94100
Tel. (01) 273-726-440-000, e-mail: tec_huatusco@hotmail.com
www.itshuatusco.edu.mx



AGRADECIMIENTOS

A dios por permitirme disfrutar de este trayecto que es el don de la vida.

Al Instituto Tecnológico Superior de Huatusco (ITSH), por darme la oportunidad de formarme profesionalmente para forjar un mejor futuro. En especial, al Dr. Salvador Partida Sedas y al Dr. Adán Cabal Prieto, director y asesor de mi trabajo de tesis. A quienes les agradezco por ser parte de mi formación profesional, así como también por todos sus conocimientos aportados, apoyo, compromiso y dedicación en la que culminaron mi carrera como Ingeniero Ambiental, a quien los admiro mucho.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), por abrir las puertas de su institución para la realización de mi residencia profesional, que sirvió de base para desarrollar mi proyecto de tesis, por lo cual me siento satisfecha por lo aprendido en ese periodo educativo. Así como al Dr. Joel Pineda Pineda por haberme brindado su asesoría profesional, paciencia, dedicación, compromiso y conocimientos compartidos.

A mis maestros que a lo largo de mi carrera cada uno contribuyó en transmitirme sus conocimientos, quienes se esfuerzan por dar lo mejor, les agradezco por ser parte de mi formación profesional.

A cada uno de mis compañeros que de corazón les agradezco su apoyo, su compañía y su valiosa amistad de quienes me llevo gratos recuerdos, en la que reí y aprendí mucho de ellos; les deseo lo mejor y mucho éxito en esta nueva etapa que comienza. Se les quiere.

DEDICATORIA

A mi madre María de la Luz Lina Vargas Solís por ser mi luz en cada momento de la vida, por su apoyo, comprensión, paciencia, amor incondicional, por todos los valores inculcados y consejos que me ha brindado a lo largo de mi vida, por ser una mujer fuerte y siempre muy valiente. ¡Gracias mamá por todo, te amo!

A mi padre Salvador Pérez Bernabé por todo el amor, apoyo y consejos que me brindo, así como también los valores inculcados, Por enseñarme a salir siempre adelante por ser el mejor papá que pude tener, quien se nos adelantó pero me quedo con la satisfacción de que fue un gran hombre, que donde quiera que este, sé que estará orgulloso de mi por este logro alcanzado. ¡Gracias a ti papá, te amo!

A mis hermanos Beatriz Raquel Pérez Vargas, Luis Eduardo Pérez Vargas, David Pérez Vargas, Margarita Pérez Vargas, Rafael Pérez Vargas por su confianza, cariño y apoyo incondicional que me brindan cada día para ser mejor persona, así como también por sus consejos, que son mi guía para lo largo de mi vida. ¡Los amo!

A mi familia y a todos mis tíos por su infinito amor, apoyos y consejos que me muestran diariamente, lo que me llena de gran satisfacción poder contar con ellos siempre, tanto en los buenos y malos momentos. ¡Los quiero!

A mí ahijado Marco Iván Morales Pérez que con sus pequeñas travesuras, chistes y felicidad, siempre alegra mis días, me encanta por ser un niño tan listo y lindo, quien me demuestra su amor y cariño en cada momento de la vida. ¡Te quiero!

A mi enamorado Gabriel Esquivel López, a quien le agradezco de todo corazón su apoyo, cariño, amor y confianza incondicional durante este maravilloso tiempo, por sus buenos consejos y por motivarme a siempre seguir adelante ¡Te amo!

INDICE

INDICE	vii
INDICE DE FIGURAS	xi
INDICE DE TABLAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN	xv
ABSTRACT.....	xvi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES	5
III. MARCO TEÓRICO	6
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL SUELO	6
3.1.1. DELIMITACIÓN DE UN PERFIL POR HORIZONTES EN EL SUELO ..	6
3.2. AGUA FREÁTICA Y NIVEL FREÁTICO	8
3.2.1. FLUCTUACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO	9
3.2.2. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO	10
3.2.3. RETENCIÓN DE AGUA EN LOS SUELOS	11
3.2.4. MOVIMIENTO DE SALES Y NUTRIMENTOS POR FLUCTUACIÓN DE NIVEL FREÁTICO	12
3.3. CALIDAD DE SUELO.....	13
3.3.1. INDICADORES DE CALIDAD SUELO	15
3.4. INDICADORES FÍSICOS DE CALIDAD DE SUELO.	17
3.4.1. TEXTURA.....	17
3.4.2. HUMEDAD	17
3.4.3. DENSIDAD APARENTE	17

3.5. MEDICIÓN DE INDICADORES QUÍMICOS PARA LA CALIDAD DE UN SUELO.....	18
3.5.1. MATERIA ORGÁNICA	18
3.5.2. pH.....	18
3.5.3. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	19
3.5.4. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO	19
3.5.5. CARBONATOS	19
3.5.6. FOSFATOS	20
3.5.7. NITRÓGENO	20
3.5.8. NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL	21
3.6. MINERALIZACIÓN	21
3.6.1. AMINIZACIÓN	22
3.6.2. AMONIFICACIÓN.....	22
3.6.3. NITRIFICACIÓN.	23
3.6.4. NITRÓGENO MINERAL	23
3.6.5. DESNITRIFICACIÓN.....	24
3.7. IMPACTO AMBIENTAL DEL EXCESO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS.....	24
3.8. IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE NITRÓGENO EN EL SUELO	25
3.9. FÓSFORO	25
3.9.1. MOVILIDAD DEL FÓSFORO EN EL SUELO	26
3.9.2. ABSORCIÓN DE FÓSFORO DEPENDIENDO DE LAS CONDICIONES EN EL SUELO	27
3.9.3. AFECTACIÓN AL CRECIMIENTO DE UNA PLANTA A PARTIR DEL CONTENIDO DE (P).....	28
3.9.4. DEFICIENCIA O EXCESO DE FÓSFORO.....	29

3.9.5. EL FÓSFORO PARA LA INGENIERÍA AMBIENTAL	30
3.9.6. FUNCIÓN DEL FÓSFORO EN LAS PLANTAS.....	31
3.9.7. EL FÓSFORO Y SU INTERACCIÓN CON EL NITRÓGENO	33
3.10. POTASIO	33
3.10.1. FUNCIÓN DEL POTASIO EN LAS PLANTAS	34
3.11. CALCIO	34
3.12. MAGNESIO.....	35
3.13. MICRONUTRIMENTOS.....	37
3.14. MOVILIDAD DE LOS NUTRIENTES EN EL SUELO BAJO FERTIRRIEGO	38
3.15. DIAGNÓSTICO DE FERTILIDAD EN SUELOS	38
3.16. LISÍMETROS DE SUCCIÓN O CHUPATUBOS.....	39
IV. JUSTIFICACIÓN	40
4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	41
V. OBJETIVOS	43
5.1. OBJETIVO GENERAL	43
5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	43
VI. HIPÓTESIS.....	43
VII. METODOLOGÍA.....	44
7.1. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.....	44
7.1.1. LOCALIZACIÓN.....	44
7.1.2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO.....	45
7.1.3. MUESTREO	46
7.1.4. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS	47
7.1.5. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS.....	48

7.1.6. MANEJO DE MUESTRAS	48
7.1.7. ANÁLISIS DE DATOS.....	48
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
8.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICO POR PERFILES DE (N)	54
8.2. NITRÓGENO TOTAL	55
8.2.1. NITRATO (NO_3^-)	56
8.2.3. AMONIO (NH_4^+)	56
8.3. FÓSFORO (P).....	57
8.4. MANTO FREÁTICO.....	58
IX. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	61
X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfil general de un suelo. El espesor, presencia y composición de los horizontes varía en función del tipo de suelo y las condiciones climáticas.	8
Figura 2. Distribución del agua subterránea. La forma del nivel freático suele ser una réplica suavizada de la topografía superficial.	10
Figura 3. Relación entre ciclo de nitrógeno y los compartimentos orgánicos y minerales los recuadros color negro indican la entrada del sistema, los grises fracciones disponibles; sin recuadro procesos y factores que tienen influencia en la disponibilidad de nitrógeno.	22
Figura 4. Formas del Fósforo	29
Figura 5. El contenido de fósforo afecta la capacidad de plantas de maíz para absorber este nutrimento durante los periodos de estrés de humedad.	32
Figura 6. Relación entre ciclo de nitrógeno y los compartimentos orgánicos y minerales los recuadros color negro indican la entrada al sistema, los grises fracciones disponibles; sin color las fracciones minerales, sin recuadro procesos y factores que tienen influencia en la disponibilidad de fósforo.	33
Figura 7. Macro localización de la realización de práctica en campo.	44
Figura 8. Micro localización de la realización de análisis de suelo.	45
Figura 9. Invernadero del área a analizar	46
Figura 10. Recorrido de terreno.	46
Figura 11. Pozo pedológicos perfil 1	46
Figura 12. Delimitación de perfil 2	46
Figura 13. Perfil de suelo 3.	47
Figura 14. Perfil de suelo 4.	47
Figura 15. Representación de manto freático.	47
Figura 16. Recolección de muestras por horizontes y perfiles.	47
Figura 17. Concentración de amonio, nitratos y Nitrógeno total en perfil 1	54
Figura 18. Concentración de amonio, nitratos y Nitrógeno total en perfil 2	54
Figura 19. Concentración de amonio, nitratos y Nitrógeno total en perfil 3	55
Figura 20. Concentración de amonio, nitratos y Nitrógeno total en perfil 4.	55
Figura 21. Correlación de la concentración de P ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).	57

Figura 22. Concentración de Fósforo en los cuatro perfiles.	58
Figura 23. Representación gráfica de los parámetros obtenidos en el manto freático.	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos para monitorear los cambios que ocurren en el suelo propuestos por Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994.	15
Tabla 2. Método a seguir para la medición de parámetros físicos	18
Tabla 3. Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para la determinación de calidad de un suelo.	36
Tabla 4. Modelos para transformar valores nutrimentales en extracto de saturación a valores en solución de suelo, Sonneveld y Voogt (2009).	50
Tabla 5. Niveles nutrimentales y relaciones entre algunos nutrimentos en el extracto de pasta de saturada en cultivos con fertirriego, Burgueño (1995).	51
Tabla 6. Niveles nutrimentales en pasta de saturación (Castellanos, 2004).	51
Tabla 7. Clasificación de niveles nutrimentales en la solución del suelo para sondas de succión obtenidos con los modelos de Sonneveld y Voogt (2009) a partir de valores en extracto de saturación reportados por Castellanos (2004).	52
Tabla 8. Contenido nutrimental en solución de suelos para sondas de succión manejados bajo fertirriego obtenidos con los modelos de Sonneveld y Voogt (2009) a partir de valores en extracto de saturación reportados por Burgueño (1995).	52
Tabla 9. Resultados obtenidos en la determinación de los parámetros en el suelo por perfiles de acuerdo a los sectores analizados.	53
Tabla 10. Resultados obtenidos de los diferentes parámetros en el manto freático del suelo.	59

LISTA DE ABREVIATURAS

ADP	Adenosin difosfato
Al	Aluminio
APHA	Por sus siglas en ingles American Public Health Association acuerdan acciones para llevar información científica al público hispano de Estados Unidos y de todas las Américas.
ASTM	Por sus siglas en ingles American Society for Testing and Materials es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas.
ATP	Adenosin trifosfato
Ca	Calcio
CE	Conductividad eléctrica
CIC	Capacidad de intercambio catiónico
Cl	Cloro
Cm	Centímetro
Cm ³	Centímetros cúbicos
Cmol/kg	Centimol/kilogramo
Cu	Cobre
DNA	ácido desoxirribonucleico
FAO	Por sus siglas en inglés: (Food and Agriculture Organization) Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
Fe	Hierro
Fig.	Figura
H	Hidrógeno
Ha	Hectárea
Hrs.	Horas
H ₂ PO ₄	Fosfato dihidrogeno
K	Potasio
Kg	kilogramo
Mg	Magnesio
Mmhos/cm	Milimhos/centímetro
Mn	Manganeso
MO	Materia orgánica
Mpa.	Megapascal
mSiems/n	Unidades de conductividad
N	Nitrógeno

Na	Sodio
NH ₄	Amonio
NO	Monóxido de nitrógeno
NOM	Norma
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
NO ₃	Nitrato
Nt	Nitrógeno total
N ₂ O	Óxido Nitroso
P	Fósforo
pH	Potencial hidrógeno
Ppm	Partes por millón
RNA	Ácido ribonucleico
SO ₂	Dióxido de Azufre
USDA	El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (en inglés, United States Department of Agriculture, USDA).
Zn	Zinc
2NH ₄	Dicromato de amonio

RESUMEN

La evaluación de la calidad y salud del suelo nos permite conocer y analizar este recurso natural a partir de indicadores que describen las propiedades del suelo y su estado de degradación. La medición de parámetros físicos - químicos del suelo es un clave para conocer la calidad de un suelo y el grado de sustentabilidad en cultivos agrícolas y de esa forma mantener su capacidad para proveer servicios eco sistémicos. El análisis físicoquímico del suelo es fundamental para evaluar su fertilidad, capacidad productiva y es la base para definir dosis de nutrientes a aplicar.

El objetivo del presente trabajo recepcional fue analizar y evaluar la calidad de suelo por medio de indicadores químicos en suelos agrícolas presentes en los invernaderos del campo experimental “La cerona” en la ciudad de Texcoco Estado de México así mismo, se planteó la necesidad de conocer su estado de salud y proponer estrategias para un mejor manejo a partir de una evaluación de la dinámica nutrimental en un perfil de suelo con fluctuación de nivel freático y manejado bajo fertirriego.

En el área a analizar se muestrearon cuatro perfiles de suelo por horizontes dentro del invernadero. Se extrajo la fracción soluble y disponible del suelo a través del método de solución de suelo extraída con sondas de succión o chupa tubos en el análisis, determinando la cantidad soluble y disponible de N y P.

ABSTRACT

The evaluation of the quality and health of the soil allows us to know and analyze this natural resource from indicators that describe the properties of the soil and its state of degradation. The measurement of physical parameters - chemical soil is a key to know the quality of a soil and the degree of sustainability in agricultural crops and thus maintain its ability to provide eco systemic services. The physical-chemical analysis of the soil is essential to assess its fertility, productive capacity and is the basis for defining doses of nutrients to be applied.

The objective of the present reception work was to analyze and evaluate the quality of the soil through chemical indicators in agricultural soils present in the greenhouses of the experimental field "La Cerrona" in the city of Texcoco State of Mexico. The need was raised to know their health status and propose strategies for better management based on an evaluation of the nutritional dynamics in a soil profile with water table fluctuation and managed under fertigation.

In the area to be analyzed, four soil profiles were sampled by horizons within the greenhouse. The soluble and available fraction of the soil was extracted through the soil solution method extracted with suction probes or sucks tubes in the analysis, determining the soluble and available amount of N and P.

I. INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente fundamental en la agricultura, debido a que les proporciona nutrición y soporte a las plantas (Abi-Saab, 2012). Por su parte la salud del suelo es un término que es ampliamente utilizado dentro de discusiones sobre agricultura sostenible para describir el estado general o la calidad del recurso suelo, la degradación es a menudo más lenta y sutil, y puede afectar solo a la producción agrícola y el ambiente durante años. Por esta razón esta investigación se ha dirigido a plantear una medición de la salud del suelo, que pueda utilizarse para supervisar su condición, para informar y evitar su degradación (kibblewhite *et al.*, 2008).

La mayoría de los suelos agrícolas de México han sido sobre-explotados o sub-utilizados, provocando con ello un fuerte deterioro (Muñoz, 2009). El uso intensivo o mal manejo del suelo puede causar cambios en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales reducen su calidad, al afectar las funciones básicas y beneficios que el suelo ofrece a los seres humanos. A medida que la intensidad de uso del suelo se incrementa, decrece la cobertura vegetal, así como la densidad de raíces asociada a dicha cobertura, afectando significativamente la cantidad y calidad del carbono orgánico del suelo.(Lal *et al.*, 1999).

La calidad del suelo, integra e interconecta los componentes y procesos biológicos, químicos y físicos de un suelo y los vincula a funciones específicas que el suelo desarrolla (George, 2006).

Una evaluación de la calidad del suelo es indispensable para determinar si su sistema de manejo es sustentable, a corto y largo plazo (Larson y Pierce, 1991). Los indicadores de calidad no son solo útiles para evaluar el estado o condición del suelo, también pueden ayudar a proponer políticas de manejo del suelo.

La necesidad de contar con mediciones de una gran cantidad de variables ha llevado a la generalización del desarrollo y uso de indicadores de calidad del suelo, que utilizan la información edáfica de manera conjunta con otras variables ambientales para definir las bases de una agricultura menos agresiva, sustentable

y ecológicamente compatible (Karlen *et al.*, 2003). La calidad del suelo evalúa el uso de la tierra desde el punto de vista de cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Norfleet *et al.*, 2003).

Un suelo con buena calidad es aquel que es lo suficientemente fuerte para mantener una buena estructura, mantener los cultivos en posición vertical, resistir la erosión y la compactación, así como permitir el crecimiento de raíces sin restricciones y favorecer la proliferación de la flora y fauna del suelo. También tiene una buena transmisión del fluido y características de almacenamiento que permiten tener las proporciones correctas de agua, nutrientes disueltos y aire, para el máximo rendimiento de los cultivos y la mínima degradación ambiental (Jaramillo, 2002).

La evaluación de la calidad y salud del suelo es una herramienta fundamental para conocer el estado de salud de este sistema y promover su manejo racional, así como la generación de estrategias que permitan tanto su aprovechamiento como su conservación. Para esta evaluación se analizan sus propiedades, y se comparan con sistemas de referencia y con sistemas bajo diferente manejo. Este análisis puede permitir seleccionar, desarrollar y promover estrategias agrícolas de menor impacto y que aseguren tanto el bienestar ambiental como la seguridad alimenticia (Frowen, 2016).

Los sistemas agrícolas han conducido al deterioro del suelo, desde el punto de vista físico y químico, generando pérdida en la productividad, menores rendimientos y mayores problemas ambientales (Pastor *et al.*, 2014). Su degradación significativa demanda la expansión de la frontera agrícola, y a su vez, la reducción de las áreas naturales importantes para la diversidad y la conservación (Tilman, 1999; Jackson *et al.*, 2007 y Etter & Sarmiento, 2008).

De ahí la importancia de conocer el estado del suelo para evaluar que estos sistemas sean sostenibles (Astier, 2002). De acuerdo con Gliessman (2002) y Vandermeer (2011), la sostenibilidad de la producción de alimentos y la seguridad alimentaria de las generaciones futuras dependen de la conservación y el buen manejo del suelo.

Una evaluación del suelo permite comprender y revertir el deterioro en la funcionalidad ecosistémica que ocurre como consecuencia de la degradación de los suelos, generada por fenómenos como erosión, compactación, pérdida de nutrientes, contaminación, alteraciones en el pH, aumento en la solubilidad de metales pesados, reducción de la densidad y actividad biológica; la mayoría de ellos causados por la implementación de prácticas de manejo inadecuadas.

La unidad de estudio en los suelos es el perfil, el cual es un corte vertical del terreno, que permite estudiar el suelo en su conjunto desde su superficie hasta el material originario (Ortiz y Ortiz, 1980). Al observar un perfil, pueden distinguirse capas que se denominan horizontes. Cada uno de ellos suele tener características y propiedades diferentes en un mismo suelo, de ahí la importancia de su identificación para estudiarlos, describirlos y muestrearlos separadamente (Porta *et al.*, 2003).

Algunos suelos se hallan fuertemente influidos por la presencia de una capa freática a uno o dos metros de la superficie. El balance entre los movimientos ascendentes y descendentes del agua influye profundamente en la naturaleza del suelo (Thompson, 1980).

Las fluctuaciones de los mantos freáticos, en gran medida debido al efecto de las precipitaciones y a las láminas de riego, indican que es muy posible la salinización de los horizontes superficiales del suelo debido a la evaporación de las aguas freáticas que tienen una alta concentración de sales solubles, afectándose como consecuencia de esto el desarrollo de los cultivos debido al nivel de agua freática cerca de las raíces de las plantas (Buol *et al.*, 1981).

La movilidad de los iones en el suelo es importante porque condicionan el manejo de la nutrición de un cultivo. El éxito en el manejo de la fertilidad del suelo depende en gran medida de la oportunidad y precisión con que se aplique un programa de diagnóstico del estado nutrimental. El diagnóstico de la fertilidad del suelo permite identificar problemas de carácter nutrimental, así como no nutrimentales, que pudiesen estar afectando, o que pudiesen afectar en el futuro, el crecimiento y el desarrollo de un cultivo (Alcántar y Trejo, 2007).

La fluctuación del nivel freático en los suelos del Ex Lago de Texcoco es una problemática para la agricultura desde que se ha establecido en estos terrenos, ya que no solo afecta el drenaje subterráneo sino también a la movilidad y dinámica de los nutrientes que se aportan al suelo para la nutrición de los cultivos agrícolas. Es por eso que el objetivo del presente trabajo tiene como finalidad analizar la dinámica nutrimental en un perfil de suelo con problemas de fluctuación del nivel freático durante el año, haciendo las determinaciones a través del método de extracción de la fracción soluble y disponible de los nutrientes en el suelo.

II. ANTECEDENTES

En los últimos años los compuestos químicos orgánicos e inorgánicos producto de la actividad humana han jugado un papel importante sobre la calidad de los recursos naturales, particularmente en los suelos, vegetación y aguas superficiales y subterráneas. Entre las que existen sustancias que han causado mayores problemas ambientales, debido al uso excesivo de plaguicidas (Adriano y Berthelin, 1998; Cortinas, 2002).

Por otra parte, el suelo tiene diversas funciones e importantes dentro del ciclo de la vida; debido a que este recurso actúa como un amortiguador ambiental, interviene en la infiltración del agua y retención de los contaminantes, es la base para el desarrollo de las plantas y animales, por ende interviene en la producción de alimentos y en la salud humana. Por lo tanto para asegurar la capacidad agrícola del suelo es necesario mantener su calidad, la cual es determinada por sus propiedades físicas, químicas y biológicas inherentes a él (Acton y Padbury, 1993; Lewandowski y Zumwinkle, 1999).

La interacción entre los organismos del suelo y los factores abióticos del ambiente durante los procesos de descomposición de la materia orgánica determinan en gran medida la fertilidad del suelo (Anderson, 2001). En este sentido, se deben buscar indicadores de calidad de suelo que expresen estas interacciones en procesos relacionados con la funcionalidad del mismo. Esto lleva a considerar a los grupos funcionales microbianos como posibles indicadores de los cambios ambientales o disturbios que están asociados con la calidad del suelo. (Beare *et al.*, 1992).

III. MARCO TEÓRICO

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL DEL SUELO

Los límites del horizonte proporcionan información del proceso formador del suelo dominante que han desarrollado a ese suelo. En algunos casos, estos reflejan los impactos antropogénicos en el paisaje del pasado. Sus límites son descritos en términos de profundidad, distinción y topografía (FAO, 2009).

Una vez identificado el perfil del suelo de acuerdo a su clasificación, se trabajará con el pozo pedológico, en función de las características superficiales identificadas, y de acuerdo a ello, se designa la superficie del área de estudio. Lo anterior se realizará con base a lo que establece SARH (1979), que por cada 100 ha un pozo pedológico es representativo de esa superficie. Posteriormente se realiza la toma de muestras de cada perfil identificando previamente los diferentes horizontes que se observen. Para ello se deberá tener cuidado de no contaminar la toma de muestra, y empezando el muestreo con dirección de abajo hacia arriba.

3.1.1. DELIMITACIÓN DE UN PERFIL POR HORIZONTES EN EL SUELO

Los horizontes se delimitan de acuerdo a lo siguientes puntos.

- ✓ De forma más evidente por las diferencias de color.
- ✓ Por diferencia en las propiedades morfológicas: Textura, estructura, elementos gruesos.
- ✓ Por diferencia en propiedades asociadas:
Consistencia: compactación, plasticidad, adhesividad, friabilidad y dureza (Porta *et al.*, 2003).

Los horizontes del suelo son cuerpos reales, subpartes del suelo individual, que se extienden lateralmente en las direcciones x y y, verticalmente a lo largo del eje z. En el campo, los horizontes del suelo se describen de acuerdo con las siguientes propiedades: color, textura, consistencia, estructura, cutáneas, nódulos o concreciones, pH (método de campo) características del límite y continuidad del

horizonte. Se mide y se anota el espesor y la profundidad de cada horizonte bajo la superficie del suelo. La habilidad con la cual se reconocen y anotan las propiedades del suelo que determina la calidad de la descripción resultante (Buol *et al.*, 1981).

Para el beneficio de su estudio y descripción, los niveles que resultan de los procesos de formación de un suelo se agrupan en grupos y horizontes designados con letras mayúsculas O, A, E, B, C y R por lo que representan los principales horizontes y capas de suelos, (figura 1). Las letras mayúsculas son los símbolos básicos a los cuales pueden agregarse otros caracteres para completar la designación. La mayoría de los horizontes y capas reciben un símbolo con una única letra mayúscula, pero algunos requieren dos. Actualmente se reconocen seis horizontes y capas principales (Buol *et al.*, 1981).

Los horizontes principales y sus subdivisiones representan capas que muestran evidencia de cambio y algunas capas que no han sido cambiadas. La mayoría son horizontes de suelos genéticos que reflejan un juicio cualitativo acerca del tipo de cambios que han tenido lugar. Los horizontes genéticos no son equivalentes a horizontes de diagnóstico, aunque pueden ser idénticos en perfiles de suelos. Los horizontes de diagnóstico son rasgos definidos cuantitativamente usados en clasificación (Buol *et al.*, 1981).

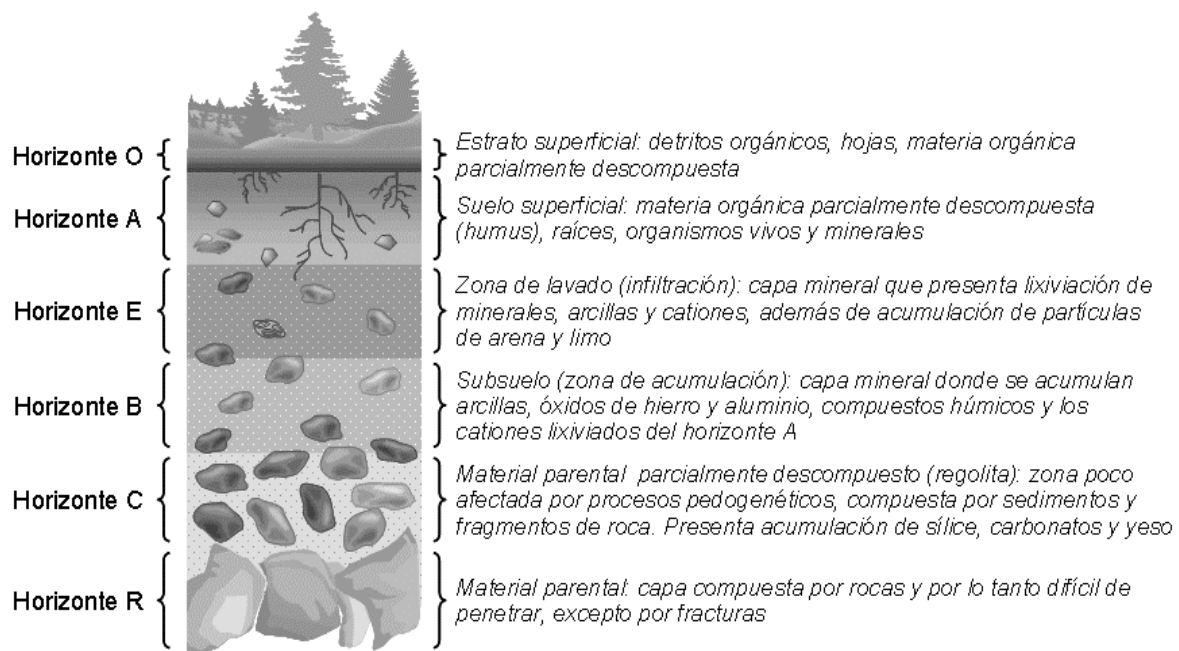


Figura 1. Perfil general de un suelo. El espesor, presencia y composición de los horizontes varía en función del tipo de suelo y las condiciones climáticas.

Fuente: Instituto Nacional de Ecología (2008).

3.2. AGUA FREÁTICA Y NIVEL FREÁTICO

Las Aguas freáticas son aquellas que se acumulan bajo la tierra, almacenadas en los poros que existen en sedimentos como la arena y la grava, y en las fisuras que se encuentran en rocas. El agua freática es parte de la precipitación que se filtra a través del suelo hasta llegar al material rocoso que está saturado de agua, se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados (debido a la gravedad) y eventualmente llegan a los arroyos, los lagos y los océanos. Ellas proceden de la precipitación y la condensación, excepto otras como las aguas connatas o fósiles (sedimentarias) y las juveniles (magmáticas) (Tarbuck y Lutgens, 2015).

Una masa de suelo, está constituida por una parte de material sólido, otra por líquidos, y otra parte por gases, pero al bajar de la superficie hacia el interior del suelo se observa que cada vez hay mayor contenido de agua, hasta el punto que el

aire es totalmente ocupado por el agua, en este punto donde el espacio solo está ocupado por la parte sólida y agua, la llamamos nivel freático. Las aguas freáticas, son entonces las aguas que se encuentran cuando el suelo está saturado, y están por debajo de este nivel freático.

El nivel freático se puede definir como “la superficie superior del agua subterránea o el nivel que bajo el suelo se encuentra saturado de agua; lugares de puntos del agua del suelo en donde la presión hidráulica es igual a la atmosférica” (Tarbuck y Lutgens, 2015).

3.2.1. FLUCTUACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO

La profundidad del nivel freático varía y puede oscilar entre cero, cuando se inicia en la superficie y centenares de metros en algunos lugares. Una característica importante del nivel freático es su configuración, ya que esta varía según las estaciones, año con año, debido a la adición del agua a un sistema de aguas subterráneas por lo que está estrechamente relacionada con la cantidad, distribución y frecuencia de las precipitaciones. Solo cuando el nivel freático se sitúa en la superficie, no puede observarse directamente. Sin embargo, su elevación puede cartografiarse y estudiarse en detalle allí donde los pozos son numerosos porque el nivel del agua en los pozos coincide con el nivel freático. Algunos mapas de niveles freáticos revelan que el nivel freático raramente es horizontal, como cabría esperar. En cambio, su forma suele ser una réplica suavizada de la topografía superficial, alcanzando sus mayores elevaciones debajo de las colinas y luego descendiendo hacia los valles (Figura.2). (Tarbuck y Lutgens, 2015).

En regiones húmedas y subhúmedas, el nivel freático tiene casi siempre un relieve que es similar al de la superficie del terreno, pero de menor amplitud; es decir, que se encuentra más cerca de la superficie en las depresiones que en los puntos elevados del terreno. Es muy frecuente que, al menos estacionalmente, la tabla freática invada el perfil del suelo. Esto suele observarse más a menudo en las depresiones que en las posiciones convexas (Tarbuck y Lutgens, 2015).

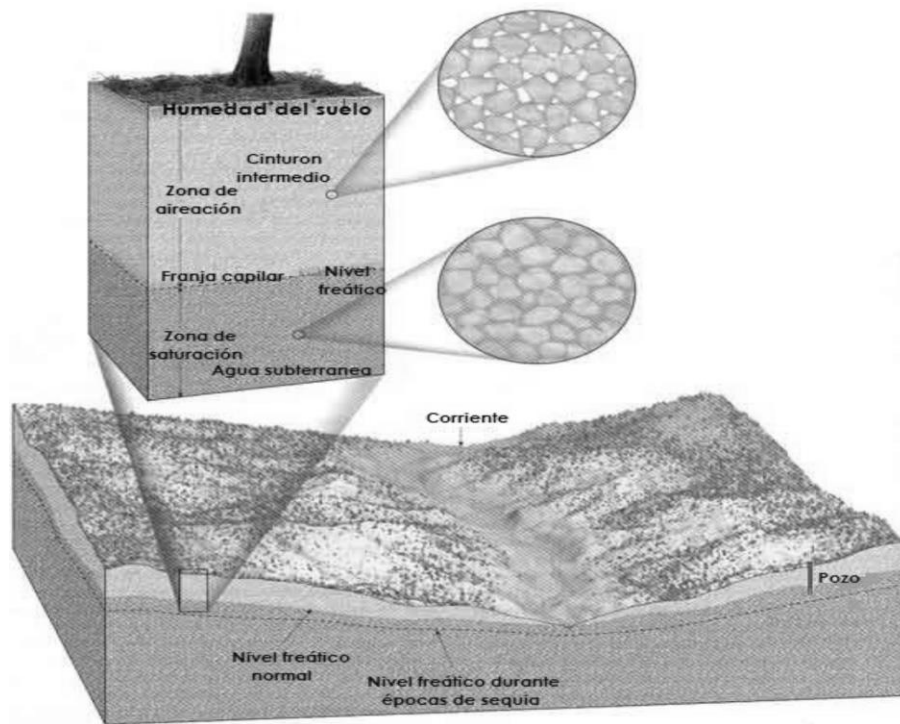


Figura 2. Distribución del agua subterránea. La forma del nivel freático suele ser una réplica suavizada de la topografía superficial.

Fuente: Tarbuck y Lutgens, 2015.

3.2.2. MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

El movimiento del agua ocurre cuando existen diferencias de potencial entre diferentes puntos del sistema suelo (Gavande, 1972). Para la mayoría de los investigadores, este movimiento depende del gradiente de potencial y de la facilidad que presente el flujo a través del medio por el cual se desplace (Singer y Moons, 2000). Su comprensión es de gran utilidad en estudios de drenaje, recuperación de suelos y calidad del medio ambiente (Núñez, 1985 y Gavande, 1986). Según Mourgues, la facilidad de movimiento que tenga el agua en el suelo impedirá que gran parte del agua de lluvia escurra y por ende a su vez se genere erosión.

Para el análisis del movimiento de agua en el suelo se deben considerar dos situaciones: El movimiento bajo condiciones saturadas y el movimiento en condiciones no saturadas.

El movimiento de agua en un suelo saturado es descrito por la ley de Darcy, que expresa que el flujo se origina producto de una diferencia de potenciales, en la dirección del punto de mayor potencial al punto de menor potencial (Salgado, 2001). Esta ley establece que la velocidad del flujo es directamente proporcional a la diferencia de potenciales y a la conductividad del medio (conductividad hidráulica), e inversamente proporcional a la distancia existente entre los dos puntos (Gavande, 1986).

Algunos suelos se hallan fuertemente influidos por la presencia de una capa freática a uno o dos metros de la superficie. Esta situación permite al agua ascender a través del suelo por capilaridad. El balance entre los movimientos ascendentes y descendentes del agua influye profundamente en la naturaleza del suelo. La eluviación no es muy efectiva si la capa freática está cerca de la superficie, pero puede serlo si aquella se encuentra a unos 100 a 150 cm de profundidad (Thompson, 1980).

Si el nivel freático se encuentra a más de un metro de la superficie, la precipitación y el consiguiente movimiento descendente de agua equivalen o excede al ascenso de la misma. Las capas freáticas muy profundas afectan al suelo únicamente de manera indirecta, a través de un posible aumento del crecimiento vegetal resultante del suministro de agua en profundidad. Sin embargo, las capas freáticas a un metro pueden producir suelos afectados por el sodio. El agua que asciende hasta la superficie es suficiente para devolver las sales de sodio muy solubles, pero no para dar lugar a una concentración o costra salina. El resultado es un suelo de elevada alcalinidad, muy desfavorable para el crecimiento vegetal. Otro efecto del sodio consiste en facilitar la movilidad de las partículas de arcilla, que migran del horizonte A al B, produciendo una fuerte diferenciación en el perfil (Thompson, 1980).

3.2.3. RETENCIÓN DE AGUA EN LOS SUELOS

El agua que se infiltra en los suelos es en parte retenida en el espacio poroso, el resto del agua se transfiere hacia estratos más profundos o hasta el nivel freático. Se considera que la capacidad de retención de agua del suelo es una característica

inherente y dependiente de las propiedades físicas: textura, estructura y porosidad (Honorato, 2000).

La retención de agua en los suelos se puede determinar mediante las curvas características de humedad, las cuales son generadas a partir de la relación existente entre los contenidos volumétricos de agua del suelo y los potenciales necesarios para extraer dichos contenidos de agua (Salgado, 2001). En estas curvas, en general, sucede que la cantidad de agua retenida a valores de tensión cercanos a saturación y hasta 0,1 Mpa depende de la estructura del suelo y a valores de tensión superiores a 0,1 Mpa de la textura del suelo. La compactación es otro factor que influye en la curva característica de humedad. Ésta provoca una disminución de la porosidad total y reduce el volumen de los grandes inter-agregados del suelo, lo que significa que el contenido de agua a saturación y la pérdida de agua con la aplicación de una baja succión se reducen (Hillel, 1971).

3.2.4. MOVIMIENTO DE SALES Y NUTRIMENTOS POR FLUCTUACIÓN DE NIVEL FREÁTICO

El nivel freático tiene relieve, se establece un gradiente que tiende a producir desplazamientos laterales del agua. Aunque ese desplazamiento lateral es más lento que los movimientos superficiales del agua, debido a las restricciones de las partículas sólidas, existe y sirve para transportar solutos y materiales suspendidos. En regiones húmedas, esto puede traer consigo acumulación de sales, óxidos u otros materiales suspendibles o solubles en las depresiones de los terrenos. Por lo común, esas concentraciones son menores porque el agua freática se suele retirar de la zona mediante manantiales y ríos (Buol *et al.*, 1981).

En zonas de menor precipitación, y sobre todo, cuando la evapotranspiración potencial sobrepasa la precipitación, la presencia de un nivel freático en el suelo conduce a la acumulación de sales solubles. Cuando no hay ningún mecanismo para que el agua líquida escape de una depresión y las únicas pérdidas se produzcan por evaporación quedan las sales disueltas en el agua, debido a la evaporación sobre la superficie del suelo o cerca de ella (Buol *et al.*, 1981).

Las fluctuaciones de los mantos freáticos someros, en gran medida debido al efecto de las precipitaciones y a las láminas de riego, indican que es muy posible la salinización de los horizontes superficiales del suelo debido a la evaporación de las aguas freáticas que tienen una alta concentración de sales solubles, afectándose como consecuencia de esto el desarrollo de los cultivos debido al nivel de agua freática cerca de las raíces de las plantas (Buol *et al.*, 1981).

La migración de sales se da en la dirección del flujo freático, lo cual es responsable de la salinización progresiva del suelo (Mercado *et al.*, 2011).

3.3. CALIDAD DE SUELO

La calidad de un suelo es un concepto que permite conocer que tan adecuadamente el suelo ejecuta sus funciones, esto es su capacidad para funcionar (Rodríguez, 2009). Los agricultores siempre han diferenciado, con base a sus observaciones y experiencias, cuál suelo tienen mayor o menor capacidad para sostener a sus cultivos. Reportes documentados sobre el tema existen desde el imperio Romano (Singer & Ewing, 2000). Para valorar y clasificar la tierra de acuerdo a su uso potencial, actual o aptitud para un cultivo, en algunos países se han desarrollado diversas propuestas (Hudson, 1981). Ejemplos de sistemas para separar suelos en diferentes clases de calidad son el Índice de Storie (Storie, 1932) y la clasificación USDA de tierras por capacidad (Klingebiel y Montgomery, 1973). En México aún subsisten clasificaciones campesinas de suelos basadas en características que reflejan la capacidad del suelo y por ende, en su calidad para la producción de cultivos (Ortiz, 1999).

En los últimos años, el concepto de calidad de suelo se ha desarrollado aceleradamente para abarcar, no sólo lo adecuado de un suelo para cierto uso, sino también las funciones que éste desempeña dentro del ecosistema y su relación con la sustentabilidad del mismo. Por tal razón, las definiciones de calidad del suelo se basan tanto en el uso del suelo como en las funciones de éste dentro de sistemas naturales y agrícolas (Rodríguez, 2009). Algunas definiciones que se han tenido a lo largo del tiempo como son:

“La habilidad de un suelo para sostener el crecimiento del cultivo, lo cual incluye factores tales como grado de labranza, agregación, contenido de materia orgánica, profundidad del suelo, capacidad de retención de agua, tasa de infiltración, cambio de pH, capacidad nutrimental y otros” (Power & Myers, 1989).

“La capacidad de un suelo para funcionar dentro de los límites de su ecosistema e interactuar positivamente con el ambiente externo a tal ecosistema” (Larson y Pierce, 1991)

“La capacidad de un suelo para producir cultivos nutritivos de manera sostenida durante largo tiempo, y mejorar la salud humana y animal, sin afectar al recurso natural base o dañar el ambiente” (Parr *et al.*, 1992).

“La calidad del suelo es una medida compuesta de la habilidad del suelo para funcionar y de qué tanto funciona, respecto a un uso específico” (Gregorich *et al.*, 1994)

“Lo adecuado de un suelo para sostener el crecimiento de los cultivos sin ser degradado o dañar en otra forma al ambiente” (Acton y Gregorich, 1995).

“La capacidad de un tipo específico de suelo para funcionar, dentro de sus límites naturales o del ecosistema para sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad de agua y el aire y sostener la salud humana” (Karlen *et al.*, 1997).

“La calidad del suelo es la capacidad de éste para funcionar dentro de los límites de un ecosistema sosteniendo la productividad biológica, manteniendo la calidad ambiental y promoviendo la salud de las plantas y animales” (SSA, 1997).

La calidad de un suelo, su capacidad para proporcionar servicios, para funcionar, depende de sus propiedades físicas, químicas biológicas y sus interacciones, por lo que la calidad del suelo no puede evaluarse directamente sino que se infiere

midiendo los cambios en las propiedades que se relacionen con las funciones de éste. A estas propiedades se les llama indicadores. (Rodríguez, 2009)

La evaluación de la calidad del suelo es un proceso de conocimiento de la dinámica que presentan las propiedades edáficas que existen en los suelos. Dicho conocimiento es eficaz para evaluar la sustentabilidad de las prácticas de manejo del suelo. Esta evaluación debe considerar una estructura de metas prioritarias e identificar las funciones críticas del suelo, necesarias para lograr esas metas y además seleccionar indicadores que provean información útil para dar seguimiento a los efectos del manejo sobre la funcionalidad del suelo durante un periodo (Gil-Stores *et al.*, 2005).

El mantenimiento de la calidad del suelo es crítico para un ambiente sostenible, por lo que es necesario una apropiada selección de indicadores de calidad que ofrezcan una rápida respuesta al cambio, clara discriminación entre los sistemas de manejo, mayor sensibilidad al estrés y a la restauración ambiental, reflejo de la variabilidad espacial y temporal (Gil-Stores *et al.*, 2005).

3.3.1. INDICADORES DE CALIDAD SUELO

Los indicadores de calidad del suelo se refieren a las propiedades del suelo medibles que influyen en la capacidad de realizar funciones de producción agrícola o medioambiental, (Arshad, 1992). Éstas pueden ser las propiedades físicas, químicas y biológicas, o los procesos que ocurren en él (SQI, 1996). Según Hünemeyer *et al.*, (1997).

Los indicadores de calidad del suelo indican sus propiedades físicas, químicas y biológicas que pueden ser medidas cualitativa o cuantitativamente y proveen pistas acerca de que tan adecuadamente un suelo funciona (SQI, 1996).

Tabla 1. Indicadores físicos, químicos y biológicos para monitorear los cambios que ocurren en el suelo propuestos por Larson y Pierce, 1991; Doran y Parkin, 1994.

Propiedad	Relación con la condición y función del suelo	Valores o unidades relevantes ecológicamente; comparaciones para evaluación
Físicas		
Textura	Retención y transporte de agua y compuestos químicos; erosión del suelo	% de arena, limo y arcilla; pérdida del sitio o posición del paisaje
Profundidad del suelo, suelo superficial y raíces	Estima la productividad potencial y la erosión	cm o m
Infiltración y densidad aparente	Infiltración y densidad aparente	minutos/2.5 cm de agua y g/cm ³
Capacidad de retención de agua	Relación con la retención de agua, transporte, y erosividad; humedad aprovechable, textura y materia orgánica	% (cm ³ /cm ³), cm de humedad aprovechable/30 cm; intensidad de precipitación
Químicas		
Materia orgánica (N y C total)	Define la fertilidad del suelo; estabilidad; erosión	Kg de C o N ha ⁻¹
pH	Define la actividad química y biológica	Comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
Conductividad eléctrica	Define la actividad vegetal y microbiana	dSm ⁻¹ ; comparación entre los límites superiores e inferiores para la actividad vegetal y microbiana
P, N, y K extractables	Nutrientes disponibles para la planta, pérdida potencial de N; productividad de indicadores de la calidad ambiental	Kg ha ⁻¹ ; niveles suficientes para el desarrollo de los cultivos
Biológicas		
C y N de la biomasa microbiana	Potencial microbiano catalítico y depósito para el C y N, cambios tempranos de los efectos del manejo sobre la materia orgánica	Kg de N o C ha ⁻¹ relativo al C y N total o CO ₂ producidos

3.4. INDICADORES FÍSICOS DE CALIDAD DE SUELO.

3.4.1. TEXTURA

El método más utilizado para determinar la distribución del tamaño de las partículas de los suelos es el de Bouyoucos o del hidrómetro que consiste en determinar fracciones dentro de las principales texturas (arena, limo, arcilla) como valores para arena fina, limo grueso, medio y fino.

3.4.2. HUMEDAD

La humedad del suelo es la masa de agua contenida por unidad de masa de sólidos del suelo, influye en muchas propiedades físicas, tales como la densidad aparente, espacio poroso, compactación, penetrabilidad, resistencia al corte, consistencia, succión total de agua y color del suelo, por lo que su medición del porcentaje de humedad en la muestra (Flores y Alcalá, 2010). Este parámetro se realiza de acuerdo al método del análisis estándar ASTM D 2974-87 (1995)-Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock Mass).

3.4.3. DENSIDAD APARENTE

La densidad aparente es el peso del suelo seco por unidad de volumen de suelo. Esta propiedad está relacionada con la porosidad (espacio poroso) y la compactación; se utiliza para calcular el contenido volumétrico de agua del contenido gravimétrico de agua (Enciso *et al.*, 2007).

Para la determinación de la densidad aparente se realiza en base a la Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo de la USDA.

Tabla 2. Método a seguir para la medición de parámetros físicos

Parámetro	Método a emplear	Referencia
Textura	Bouyoucos	Nom-021-RECNAT-2000
Densidad aparente	Método de la probeta	Nom-021-RECNAT-2000

3.5. MEDICIÓN DE INDICADORES QUÍMICOS PARA LA CALIDAD DE UN SUELO

3.5.1. MATERIA ORGÁNICA

La materia orgánica (MO) se expresa en porcentaje. Se refiere a la cantidad de restos orgánicos que se encuentran alterados y que por lo tanto pueden dar lugar a aumentar el contenido en nutrientes del suelo (Garrido 1993).

Este procedimiento se lleva a cabo de acuerdo a la norma ASTM D2974-87 *Standard Test Methods for Moisture Ash, and Organic Matter of Peat and other Organic Soils*. Así como también se toma en cuenta el método de la oxidación- vía húmeda Walkley y Black, la cual se basa, en la reacción de la materia orgánica ante agentes oxidantes que es favorecida por la liberación del calor (Castillo, 1999).

Cationes intercambiables extractables (Ca, Mg, K y Na) con acetato de amonio 1N pH 7.0 y cuantificados por espectroscopia de absorción atómica.

3.5.2. pH

El pH del suelo es una medida de la acidez o alcalinidad de un suelo. Un pH de 7.0 es neutral. Suelos con pH menores a 7.0 son ácidos, mientras que los valores arriba de 7.0 son básicos o alcalinos (Espinoza *et al.*, 2006). El cual para poder determinarlo se enfoca según ASTM D1293-12. 2013. *Standard Test Methods of pH of Water*.

3.5.3. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Los suelos con elevadas conductividades eléctricas impiden el buen desarrollo de las plantas, ya que contienen asimismo una elevada cantidad de sales. Se sigue la norma ASTM D1125-14 *Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water*.

La conductividad eléctrica es la capacidad de una solución acuosa para transportar una corriente eléctrica, que generalmente se expresa en mmhos/cm o en mSiemens/m. De acuerdo con Garrido (1993), también representa una medida indirecta de la cantidad de sales que contiene un suelo. Es decir, se utiliza para medir el riesgo potencial de daño a una planta debido a las sales en el suelo (Espinoza *et al.*, 2006). Este parámetro se puede realizar de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000.

3.5.4. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se refiere a la habilidad de las partículas de suelo que tienen carga negativa para atraer y retener cargas positivas de iones [calcio (Ca^{++}), manganeso (Mg^{++}), potasio (K^{+}), sodio (Na^{+}), amonio (NH_4^{+}), aluminio (Al^{+++}) e hidrogeno (H^{+})]. La CIC es también un indicador de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica. Se expresa en unidades de Porcentaje de Saturación de Bases centimoles por kilogramo (cmol/kg) (Espinoza *et al.*, 2006). Este parámetro se puede realizar de acuerdo a la norma ASTM D7503-10.

3.5.5. CARBONATOS

La determinación de carbonato total se realiza por acidimetría descrita en el libro *Handbook of Soil Analysis. Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*.

3.5.6. FOSFATOS

Para la determinación de fósforo como fosfato se aplica el método del ácido ascórbico (4,500-P E.) de la norma APHA *Standard Methods for the examination of water and wastewater*.

3.5.7. NITRÓGENO

El nitrógeno es esencial en las plantas porque es utilizado para sintetizar aminoácidos que son los componentes primarios de las proteínas, las cuales están presentes en el protoplasma de todas las células vivas. De igual manera, las plantas requieren nitrógeno para sintetizar otros compuestos vitales, como clorofila, ácidos nucleicos y enzimas (CPHA, 2004).

En el suelo existen dos fuentes de nitrógeno para las plantas, una orgánica y otra mineral. La forma orgánica está constituida por nitrógeno proteínico, nucleico, azúcares, aminados y otros. El nitrógeno inorgánico se encuentra en forma de NH_4^+ nativo fijo, NH_4^+ intercambiable y NO_3^- y otro N-mineralizado (Fassbender, 1987).

Este es absorbido por las plantas principalmente en forma de iones nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). Las plantas utilizan estas dos formas de nitrógeno en sus procesos de crecimiento, aunque la mayor parte la absorben en forma de nitrato, por lo que se hace necesaria la mineralización del nitrógeno (CPHA, 2004).

El Nitrógeno es el nutriente que se suministra más a menudo como fertilizante. Las plantas lo requieren en grandes cantidades. Alrededor de un 78% del aire es nitrógeno, pero éste elemento en forma gaseosa es inaccesible a la planta superior. Para ser utilizado debe previamente combinarse con Hidrógeno, Oxígeno o Carbono. Los procesos de combinación del Nitrógeno con otro elemento reciben el nombre de fijación de Nitrógeno y se realizan en la naturaleza gracias a la acción de ciertos microorganismos y a las descargas eléctricas en la atmósfera. Sin embargo, la cantidad de nitrógeno fijado suele ser pequeña en comparación con la que las plantas podrían utilizar. Es un nutriente esencial para el crecimiento de los vegetales, ya que es un constituyente de todas las proteínas. Es absorbido por las

raíces generalmente bajo las formas de NO_3^- y NH_4^+ . Su asimilación se diferencia en el hecho de que el ión nitrato se encuentra disuelto en la solución del suelo, mientras que gran parte del ión amonio está adsorbido sobre las superficies de las arcillas. El contenido de nitrógeno en los suelos varia en un amplio espectro, pero valores normales para la capa arable son del 0,2 al 0,7%. Estos porcentajes tienden a disminuir acusadamente con la profundidad. El nitrógeno tiende a incrementarse al disminuir la temperatura de los suelos y al aumentar las precipitaciones atmosféricas.

3.5.8. NITRÓGENO TOTAL KJELDAHL

Para la determinación de la suma de compuestos de nitrógeno de las muestras se sigue la norma ASTM D 2973-10 *Standard test Method for Total Nitrogen in Peat Materials*, así como algunas consideraciones de la norma ASTM D 3590-89 *Standard Test Method for Total Kjeldahl Nitrogen in water*.

3.6. MINERALIZACIÓN

Es un proceso microbiano en el que las formas orgánicas de N en el suelo son convertidas a formas inorgánicas (Amonio, nitritos y nitratos). La mineralización se da paso por paso en tres reacciones, las dos primeras son llevadas a cabo por organismos heterótrofos, mientras que la tercera es llevada a cabo por bacterias heterótrofas. Estas tres etapas se denominan aminización, amonificación y nitrificación. (Fig.3). (Prasad y Power, 1997).

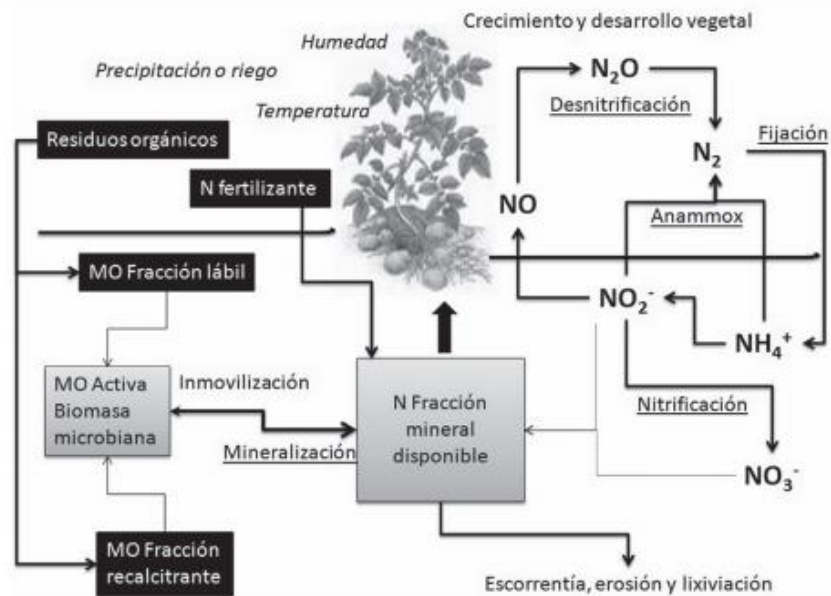


Figura 3. Relación entre ciclo de nitrógeno y los compartimentos orgánicos y minerales los recuadros color negro indican la entrada del sistema, los grises fracciones disponibles; sin recuadro procesos y factores que tienen influencia en la disponibilidad de nitrógeno.

Fuente: Cerón R., L. E. y Aristizabal G., F.A. (2012) Nitrogen and phosphorus cycles dynamics in soils. *Rev. Colomb. Biotechnol.* 14 (1):285-295.

3.6.1. AMINIZACIÓN

En este proceso actúan heterótrofos, incluidos bacterias, hongos y actinomicetos, que rompen las moléculas orgánicas complejas liberando aminas y aminoácidos. Las bacterias y actinomicetos dominan en condiciones que van de neutras a alcalinas, mientras que los hongos predominan en condiciones ácidas (Prasad y Power, 1997).

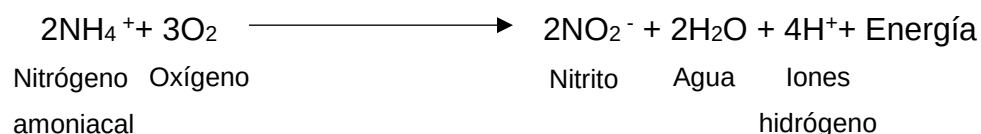
3.6.2. AMONIFICACIÓN

En este proceso los compuestos aminados se transforman en amoníaco (NH_3) y amonio (NH_4^+) (CPHA, 2004).

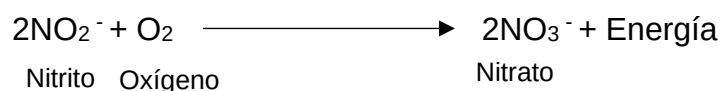
3.6.3. NITRIFICACIÓN.

Es el proceso correspondiente a la oxidación del ión amonio a nitrato. Se desarrolla en dos etapas.

- 1) El ión amonio es oxidado a nitrito (reacción catalizada por bacterias nitrosomas)
- 2) El nitrito pasa a nitrato (por la acción de la bacteria nitrobacter).



Luego, *Nitrobacter* convierte el nitrito en nitrato en donde este proceso es de dos etapas, denominado nitrificación, se realiza rápidamente en condiciones de oxígeno y humedad adecuadas, temperatura adecuada y pH óptimo.



3.6.4. NITRÓGENO MINERAL

El nitrógeno inorgánico del suelo incluye NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , N_2O , NO , y N_2 . Este último es inerte excepto por su utilización por *Rhizobium* y otros microorganismos fijadores de nitrógeno. Estas formas representan entre 2 y 5 % del nitrógeno total del suelo (Havlin *et al.*, 2005).

El nitrógeno se pierde hacia la atmósfera mediante la desnitrificación del nitrato o por medio de la volatilización del amoníaco, por lixiviación de los nitratos, especialmente en texturas gruesas donde el nitrógeno desciende un punto por debajo de la zona de la raíz donde no puede ser utilizado por las plantas y finalmente por la erosión del suelo superficial que puede llevar el nitrógeno de los campos hacia los arroyos y lagos (CPHA, 2004).

Las pérdidas de nitrógeno por lixiviación se dan principalmente en forma de NO_3^- por ser muy soluble en agua y no se adsorbe al complejo de intercambio (Havlin *et al.*, 2005). En las regiones húmedas, los procesos de lavado arrastran periódicamente la mayor parte del nitrógeno nítrico del perfil de los suelos permeables. En tales casos, las plantas adultas no tienen dificultad en absorberlo del horizonte B, pero las jóvenes, con sistemas radiculares de reducidas dimensiones, precisan disponer de nitrógeno en los primeros centímetros superficiales del suelo (Thompson, 1980).

Cuando las plantas absorben el N en forma de NO_3^- , incrementa la absorción de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+). En cambio, la absorción de NH_4^+ reduce la absorción de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e incrementa la absorción de H_2PO_4^- , SO_4^- , y Cl^- (Havlin *et al.*, 2005).

3.6.5. DESNITRIFICACIÓN.

Este es otro proceso de reducción del ión nitrato, pero esta vez a nitrógeno molecular. En suelos completamente saturados en agua se produce un empobrecimiento en oxígeno y algunos organismos anaeróbicos tienen capacidad de obtener el oxígeno de los nitratos y nitritos con liberación simultánea de nitrógeno y de óxido nitroso. Inversamente el nitrógeno mineral puede ser utilizado por los microorganismos del suelo y ser transformado en nitrógeno orgánico. Esta transformación se llama inmovilización biológica. (Thompson y Troeh, 1980).

3.7. IMPACTO AMBIENTAL DEL EXCESO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS

El problema ambiental más importante relativo al ciclo del N, es la acumulación de nitratos en el subsuelo que, por lixiviación, pueden incorporarse a las aguas subterráneas o bien ser arrastrados hacia los cauces y reservorios superficiales. En estos medios los nitratos también actúan de fertilizantes de la vegetación acuática, de tal manera que, si se concentran, puede originarse la eutrofización del medio. En un medio eutrofizado, se produce la proliferación de especies como algas y otras

plantas verdes que cubren la superficie. Esto trae como consecuencia un elevado consumo de oxígeno y su reducción en el medio acuático, así mismo dificulta la incidencia de la radiación solar por debajo de la superficie. Estos dos fenómenos producen una disminución de la capacidad auto depuradora del medio y una merma en la capacidad fotosintética de los organismos acuáticos. La textura de los suelo es un factor importante en relación con la lixiviación. Cuanto más fina sea la textura más capacidad de retención presentarán. (Thompson y Troeh, 1980).

3.8. IMPORTANCIA DEL CONTENIDO DE NITRÓGENO EN EL SUELO

- ✓ Las sales de nitrato son muy solubles, por lo que la posibilidad de que se produzca la lixiviación del anión es elevada y más teniendo en cuenta el bajo poder de adsorción que presentan la mayoría de los suelos para las partículas cargadas negativamente.
- ✓ La cantidad de nitratos que se lixivian hacia el subsuelo depende del régimen de pluviosidad y del tipo del suelo.
- ✓ La mayoría de los suelos poseen abundantes partículas coloidales, tanto orgánicas como inorgánicas, cargadas negativamente, con lo que repelerán a los aniones, y como consecuencia, estos suelos lixiviarán con facilidad a los nitratos. Por el contrario, muchos suelos tropicales adquieren carga positiva y por tanto, manifiestan una fuerte retención para los nitratos.

3.9. FÓSFORO

El fósforo es un nutrimento poco soluble y sólo 1 % o menos del existente en el suelo se encuentra disponible. Cuando mayor es la cantidad de fósforo en el suelo, mayor es la posibilidad de que este último tenga más fósforo en solución (CPHA, 2004).

El fósforo elemental (P) no se encuentra en estado libre en la naturaleza, debido a elevada facilidad de oxidación, el P es absorbido por las plantas principalmente en forma de iones orto fosfatos primarios (H_2PO_4^-) y secundarios (HPO_4^{2-}) lo que depende del pH del suelo. La mayor parte de la cantidad total del fósforo que existe

en el suelo está ligada químicamente a compuesto muy pocos solubles, está limitada solubilidad hace que el fósforo sea lavado de la zona radical de las plantas en mínimas cantidades. En suelos de neutros a alcalinos, se forman compuestos de fosfato de calcio, mientras que en suelos ácidos se producen fosfatos de hierro y aluminio (CPHA, 2004).

El fósforo en el suelo puede clasificarse en general como orgánico e inorgánico, dependiendo de la naturaleza de los compuestos en lo que se halla. La fracción orgánica se halla en el humus y otros materiales orgánicos, que pueden o no estar asociados con él, se encuentra en tres formas principales: fosfolípidos, ácidos nucleicos y fosfatos de inositol. La fracción inorgánica se halla en numerosas combinaciones con hierro, aluminio, calcio, flúor y otros elementos (Tisdale y Nelson, 1977).

3.9.1. MOVILIDAD DEL FÓSFORO EN EL SUELO

El movimiento del P se realiza principalmente por difusión, y en menor medida por flujo masal.

El P se mueve muy poco en suelos minerales, difundándose a distancias tan cortas como un 0.6 cm (Plaster, 2000). Este movimiento limitado tiene importantes implicaciones para el manejo del suelo. En lugar de la lixiviación, el fósforo se pierde más comúnmente por la escorrentía, la erosión o debido a que los suelos volátiles lo transportan desde el campo. Esto también aumenta la dificultad de las plantas para obtener un fósforo adecuado debido a su baja movilidad, es muy importante que el fertilizante de fosfato sea situado cerca de la semilla, al plantarse, o mezclado con el suelo cerca de las raíces de la planta.

Los factores principales que influyen en el ritmo de difusión son:

- a) Constante de solubilidad del P: Es una propiedad química intrínseca del elemento.
- b) Gradiente de concentración de P entre dos puntos considerados.

- c) Distancia entre los puntos entre los que se realiza la difusión y tortuosidad del medio.
- d) Humedad: la difusión se realiza en medio acuoso, por lo que se transforma en un factor crítico.
- e) Temperatura: la difusión del P aumenta con el incremento de la temperatura.

El fósforo es muy poco movable en la mayoría de los suelos. Generalmente se mantiene en el lugar donde se situó por la meteorización de los minerales o por la fertilización. Muy poco P se pierde por lixiviación, aun cuando se mueve más libremente en suelos arenosos que en arcillosos. La erosión y la remoción en el cultivo son las dos únicas formas significativas de pérdida de P en el suelo (INPOFOS, 1997).

Casi todo el P se mueve en el suelo por difusión, por lo que es un proceso lento y de poco alcance que depende de la humedad del suelo. Las condiciones secas reducen notablemente la difusión. El K también se mueve gran parte por difusión pero es más soluble que el P, por lo que puede desplazarse más lejos. Cuando se comparan las distancias a las que se desplaza en N, P y K, desde el punto en el cual fueron colocados, se observa que el N (en forma de nitrato) se mueve libremente en el suelo en comparación con los otros dos nutrientes (INPOFOS, 1997).

3.9.2. ABSORCIÓN DE FÓSFORO DEPENDIENDO DE LAS CONDICIONES EN EL SUELO

1. El pH del suelo establece principalmente el grado de fijación. El fósforo es más libre en un pH entre 6.5 y 6.8.
2. Los suelos secos detienen la difusión del fósforo a las raíces. Por consiguiente, las plantas toman mejor el fósforo en suelos húmedos.
3. El oxígeno es necesario para la descomposición de los fosfatos orgánicos. Las raíces también necesitan oxígeno para tomar nutrientes. En consecuencia, un suelo suelto y bien drenado mejora la absorción del fósforo. Un suelo compactado o pobremente drenado reduce el acceso.

4. Un suelo frío retrasa la actividad de los microorganismos que colocan el fósforo en la solución, retrasa su difusión hacia las raíces y retarda el crecimiento de la raíz. La respiración de la raíz también disminuye, privando a las raíces de la energía necesaria para absorber el fósforo. Las faltas de fosfato son normalmente en suelos mojados y fríos.
5. El balance total de nutrientes también es importante. El nitrógeno, por ejemplo, mejora la absorción del fósforo. Una cantidad demasiado alta de zinc parece que la reduce.
6. La infección de micorrizas de las raíces de la planta ayudan a ésta a absorber fósforo, especialmente en suelos deficientes de fósforo.
7. Una cosecha emplea sólo entre 10 a un 30% del fertilizante de fosfato aplicado. El resto se va a la reserva y puede ser utilizado más tarde para las cosechas.

3.9.3. AFECTACIÓN AL CRECIMIENTO DE UNA PLANTA A PARTIR DEL CONTENIDO DE (P)

- ✓ El fósforo forma parte del material genético (cromosomas y genes) por lo que está implicado en la reproducción de la planta y la división celular.
- ✓ Forma parte de las sustancias químicas que almacenan y transfieren energía en todos los seres vivos. Sin él todas las reacciones biológicas llegan a detenerse. En las plantas los ejemplos de reacciones de energía incluyen la captura de energía de la luz por la fotosíntesis y el transporte de energía en las raíces para la absorción de nutrientes.
- ✓ Estimula pronto y rápido el crecimiento de la raíz y ayuda a la joven planta a desarrollar sus raíces.
- ✓ Ayuda a las plantas a usar agua más eficientemente, mejorando el agua absorbida por las raíces.
- ✓ Mejora la eficacia de la captura del nitrógeno por las plantas, haciendo mejor empleo del nitrógeno de fertilizante y reduciendo el riesgo de contaminación del agua de la tierra debida a la lixiviación del nitrato.

- ✓ Un fósforo adecuado en el suelo asegura un suministro de suficiente fósforo a la alimentación de los animales.

El fósforo actúa de muchas maneras para equilibrar el nitrógeno. Mientras el nitrógeno retarda la madurez, el fósforo la acelera. El nitrógeno ayuda al crecimiento vegetativo; el fósforo ayuda a la floración y fructificación. Como regla empírica, el fósforo es más importante para las cosechas de las que usamos la parte de la flor (flores, frutas o semillas). El fósforo también promueve el crecimiento de la raíz temprano y rápido, por lo que es a menudo el elemento principal en los fertilizantes de arranque.

Entre un 25 y 90% de todo el fósforo del suelo reside en la materia orgánica, la que funciona como un almacén importante para este químico. Existen dos formas en que se encuentra el fósforo en el suelo, la almacenada y la disponible (Fig. 4).

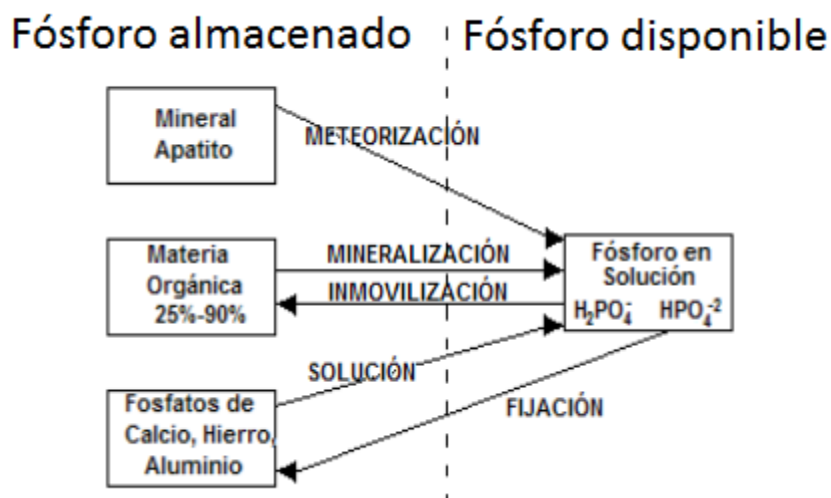


Figura 4. Formas del Fósforo

Fuente: (Plaster, 2000).

3.9.4. DEFICIENCIA O EXCESO DE FÓSFORO

Una escasez de fósforo puede impedir el crecimiento, pero la planta permanece verde. Las plantas con deficiencia de fósforo a menudo presentan un tinte púrpura

en sus hojas y tallos, empezando en las hojas más bajas y más viejas. Una escasez de fósforo puede retrasar la madurez de varias cosechas como maíz, algodón, sojas y otras. Algunas cosechas, como la zanahoria, desarrollan sistemas de raíz pobre. Por otro lado, un exceso de fósforo del suelo bloquea a otros nutrientes de la planta como el hierro.

3.9.5. EL FÓSFORO PARA LA INGENIERÍA AMBIENTAL

El P del suelo es suministrado por la meteorización de minerales principalmente. A medida que minerales como la apatita se meteoriza libera aniones que pueden ser usados por las plantas. Estos aniones son ortofosfatos primarios (H_2PO_4^-) y ortofosfatos secundarios (HPO_4^-).

En el suelo ocurren procesos en los cuales el fósforo orgánico es transformado a inorgánico disponible para las plantas debido principalmente a la acción de microorganismos que descomponen de la materia orgánica, sin embargo este proceso es de doble vía, también estos microorganismos requieren de fósforo como fuente de energía para sus procesos vitales y lo toman de la solución del suelo.

Las reacciones que fijan el fosfato dependen del pH del suelo. En suelos fuertemente ácidos (3.5-4.5) se forma fosfato de hierro insoluble. En el rango de pH de 4.0 a 6.5, el P reacciona con el aluminio. Los fosfatos de calcio son importantes en el rango de pH de 7.0 a 9.0. La máxima disponibilidad se encuentra en un pH de 6.5 (en suelos minerales), aunque el rango de 6.0 a 7.0 es satisfactorio para la mayoría de las cosechas. (Hausenbuiller R. L., 1980; Porta *et al.*, 2003 y Valdéz, 2005).

El problema ambiental de los fosfatos es, como el del N, la eutrofización de las aguas principalmente. Un exceso del fósforo, causa un crecimiento desmedido de algas, lirios acuáticos, que son los causantes del bajo nivel y pérdida de los cuerpos de agua como son: lagos, lagunas, etc. Llega a crear desequilibrios ecológicos en las comunidades y problemas en canales y embalses, generando costos importantes si se requieren limpiezas periódicas (Porta *et al.*, 2003).

Los detergentes sintéticos son sustancias tenso-activas, es decir, con capacidad para desprender la mugre y evitar que vuelva adherirse. Debido a su propiedad de producir espuma abundante con cualquier tipo de agua, sustituyeron a los jabones desde la mitad del siglo pasado. El grave problema de los detergentes es que no todos son biodegradables, es decir, no son susceptibles de ser incorporados a los ciclos naturales, por lo que permanecen por mucho tiempo como contaminantes de los suelos. (Gómez *et al.*, 2001).

Los plaguicidas son sustancias que se emplean para eliminar insectos, arácnidos, roedores, o hierbas parásitas. Algunos de los más dañinos son los insecticidas fosforados, tales como paratión, metilparatión, malatión y glutión. Los plaguicidas son sustancias con gran estabilidad. A pesar de proporcionar beneficios a la humanidad, contaminan peligrosamente el agua y la tierra pues, destruyen a los insectos que amenazan los cultivos, también aniquilan a los insectos benéficos como los polinizadores y a otros animales como aves, peces, y diversos organismos acuáticos. (Gómez, *et al.*, 2001 y López, 2007)

Es posible utilizar la biorremediación para eliminar la contaminación por plaguicidas, con el uso de microorganismos desarrollados por la biotecnología, para degradar sustancias peligrosas en sustancias menos tóxicas o que no sean Tóxicas. (López, 2007)

3.9.6. FUNCIÓN DEL FÓSFORO EN LAS PLANTAS.

El fósforo existe en todas las células vivas. Las plantas lo utilizan para sintetizar ácidos nucleicos (DNA Y RNA) y muchos otros compuestos vitales. Por medio de los enlaces ricos en energía (ATP Y ADP), interviene en el almacenamiento y la transferencia de la energía química que se utiliza en los procesos de crecimiento y reproducción (CPHA, 2004). Estimula el crecimiento de las plántulas y la formación de la raíz. Acelera la maduración y promueve la producción de semillas.

La mayoría de los cultivos requieren un complemento de fósforo: 1) Durante la temporada de frío, 2) Cuando hay un crecimiento limitado de la raíz, 3) en presencia de un rápido crecimiento vegetativo o 4) en suelos bastante calcáreos (CPHA, 2004)

Además, mejora la resistencia a las bajas temperaturas de las plántulas, incrementa la eficiencia del uso del agua, contribuye a la resistencia de algunas plantas y enfermedades (INPOFOS, 1997).

Un aspecto importante de los suelos con buen contenido de P es la influencia que esta condición tiene en la absorción de P por los cultivos durante los periodos de estrés de humedad. La fig.5 demuestra que la absorción de P de plántulas de maíz se reduce durante los periodos de estrés de humedad. Sin embargo, los efectos del estrés de humedad se reducen al menos parcialmente, cuando los niveles de P en suelos son altos (INPOFOS, 1997).

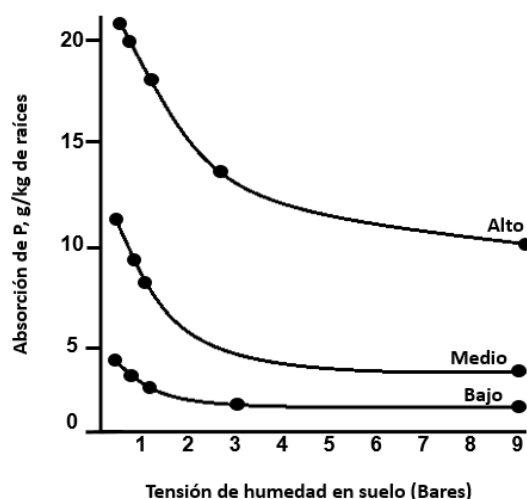


Figura 5. El contenido de fósforo afecta la capacidad de plantas de maíz para absorber este nutrimento durante los periodos de estrés de humedad.

Fuente: INPOFOS (1997).

3.9.7. EL FÓSFORO Y SU INTERACCIÓN CON EL NITRÓGENO

Las plantas absorben una mayor cantidad de fósforo cuando se añade nitrógeno amoniacal junto con fertilizantes fosfatados, fig.6. Para explicar la mayor eficiencia de la absorción del fosforo en presencia del nitrógeno, se han sugerido las siguientes razones: Aumento del crecimiento de la raíz, cambios fisiológicos que hacen a las células de la raíz más receptivas al fósforo, mayor transferencia de fosforo a través de las membranas de la raíz al xilema y disminución del pH del suelo como resultado de la nitrificación del nitrógeno amoniacal (CPHA, 2004).

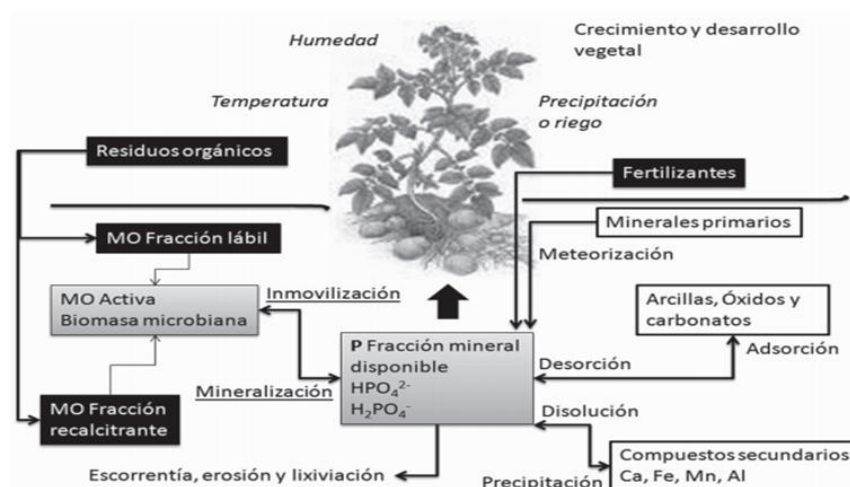


Figura 6. Relación entre ciclo de nitrógeno y los compartimentos orgánicos y minerales los recuadros color negro indican la entrada al sistema, los grises fracciones disponibles; sin color las fracciones minerales, sin recuadro procesos y factores que tienen influencia en la disponibilidad de fósforo.

Fuente: Cerón R., L. E. y Aristizabal G., F.A. (2012) *Nitrogen and phosphorus cycles dynamics in soils*. *Rev. Colomb. Biotechnol.* 14 (1):285-295.

3.10. POTASIO

El potasio es el séptimo elemento más abundante de la tierra. La capa arable de los suelos agrícolas contiene 4 a 60 t·ha⁻¹ de K, pero en su mayor parte está en forma de minerales insolubles. La corteza terrestre contiene 2.6 % de potasio, formando

parte de minerales primarios como feldespatos (KAlSi_3O_8) principalmente ortoclasa y microlina en arenas y limos, o bien en forma de micas como moscovita $\text{H}_2\text{KAl}_3(\text{SiO}_4)_3$ o biotita $(\text{H}, \text{K})^2(\text{Mg}, \text{Fe})^2 \text{Al}(\text{SiO}_4)_3$. La susceptibilidad de intemperización decrece en el orden biotita, moscovita, feldespatos. El potasio se localiza también en la estructura de muchos minerales secundarios, especialmente en ilitas, vermiculitas, cloritas y otras arcillas interestratificadas. La intemperización de los minerales primarios y secundarios libera potasio hidrosoluble e intercambiable, que puede ser aprovechado por las plantas (Alcántar y Trejo, 2007).

El potasio es absorbido por las plantas en forma de iones potasio (K^+). En las células y los tejidos vegetales, este elemento no se halla combinado en forma de compuestos, como ocurre con el nitrógeno y el fósforo, si no que tiende a permanecer en forma iónica (CPHA, 2004).

3.10.1. FUNCIÓN DEL POTASIO EN LAS PLANTAS

El potasio es esencial en la translocación de azúcares y la formación de almidón. Las células oclusivas de las estomas lo requieren para que estos se abran y cierren, proceso que es importante para el uso eficaz del agua. El potasio estimula el crecimiento de la raíz y mejora la resistencia de los cultivos a las enfermedades. Favorece la formación de vasos xilemáticos más grandes y distribuidos de manera más uniforme en todo el sistema radical. El potasio mejora el tamaño y la calidad de los frutos, granos y hortalizas y es esencial para los cultivos forrajeros de alta calidad, además de que mejora también la resistencia de las plantas perennes al frío invernal (CPHA, 2004).

3.11. CALCIO

El calcio al igual que el potasio es absorbido por las plantas como ion Ca^{2+} (Tisdale y Nelson, 1977).

En forma mineral el Ca se encuentra formando parte de minerales comunes como la calcita, dolomita, apáticas y feldespatos cálcicos, tales como anortita, andesita y

labradorita, y por su desintegración y descomposición es liberado el calcio (Alcántar y Trejo, 2007).

El papel del calcio liberado es menos complejo que el del potasio. Los iones calcio situados libremente en solución pueden:

- a) ser perdidos en las aguas de drenaje
- b) absorbidos por organismos
- c) adsorbidos por las partículas de arcilla circundantes
- d) precipitados como un compuesto cálcico secundario, particularmente en climas áridos.

En suelos ácidos, suelos de regiones húmedas, Ca^{2+} y Al^{3+} dominan el complejo de intercambio, mientras que en suelos neutrales a alcalinos el Ca^{2+} ocupa la mayoría de sitios intercambiables. Existe un equilibrio entre el Ca en solución y el Ca de los sitios de intercambio (Havlin *et al.*, 2005).

En zonas de clima árido, el calcio es generalmente alto, independientemente de la textura, como resultado de la baja cantidad de lluvia y poca lixiviación. En cambio, el calcio en los suelos ácidos se halla en forma cambiante y como minerales primarios no descompuestos (Havlin *et al.*, 2005).

3.12. MAGNESIO

El magnesio es absorbido por las plantas como ión magnesio (Mg^{2+}). Es suministrado al suelo, a partir de fertilizantes industriales, en forma de fosfato, carbonato, sulfato u óxido de magnesio (Kass, 1998).

El Mg original de los suelos proviene de la descomposición de las rocas que contienen minerales tales como la biotita, dolomita, clorita, serpentina y olivino. También se encuentra como carbonatos, uno bien conocido es la dolomita; mezcla de carbonatos de calcio y magnesio en proporciones variables. En el suelo puede encontrarse formando parte de minerales, en la materia orgánica o de forma intercambiante en los minerales arcillosos (Havlin *et al.*, 2005).

El magnesio es un elemento que fomenta la absorción y transporte del fósforo por sinergismo, ya que la presencia del magnesio dentro de la planta ayuda a la asimilación y transporte de compuestos fosfatados (Kass, 1998).

Havlin *et al.*, (2005) mencionan que una vez que el Mg está en solución puede ser:

- ✓ Lixiviado por las aguas de percolación
- ✓ Absorbido por los organismos vivientes
- ✓ Adsorbido por las partículas de arcilla circundantes
- ✓ Precipitado como mineral secundario en suelos de climas áridos.

Tabla 3.Conjunto de indicadores físicos, químicos y biológicos propuestos para la determinación de calidad de un suelo.

Parámetros a analizar.	Método empleado	Referencia
pH	Potenciómetro suelo-agua 1:2	relación NOM-021-RECNAT-2000
CE	Conductímetro suelo-agua 1:2	relación NOM-021-RECNAT-2000
MO	Walkley y Black.	NOM-021-RECNAT-2000
N inorgánico	Micro-Kjeldahl.	NOM-021-RECNAT-2000
P	Olsen para suelos alcalinos y Bray para suelos ácidos	NOM-021-RECNAT-2000
K	Espectrometría de Flama	Manual de análisis químico

Ca	Complejometria	Manual de análisis químico
Mg	Complejometria	Manual de análisis químico
Fe	Espectrofotómetro absorción atómica	de NOM-021-RECNAT-2000
Mn	Espectrofotómetro absorción atómica	de NOM-021-RECNAT-2000
Zn	Espectrofotómetro absorción atómica	de NOM-021-RECNAT-2000
Cu	Espectrofotómetro absorción atómica	de NOM-021-RECNAT-2000

3.13. MICRONUTRIMENTOS

Se denominan micro nutrientes a aquellos elementos nutritivos que, siendo esenciales, son utilizados por las plantas en cantidades relativamente bajas. De entre ellos, los micronutrientes metálicos Fe, Mn, Cu, Zn y Mo están presentes en suelos y sustratos principalmente como óxidos o hidróxidos u otras sales insolubles, cuya solubilidad es mínima a pH básicos y alcalinos (Cadahía, 2005).

En el suelo pueden encontrarse formando parte de minerales primarios, ocluidos en óxidos y/o carbonatos, formando complejos con la materia orgánica, como cationes de cambio y como fases solubles en la solución del suelo (Shuman, 1979).

La disponibilidad de los micro nutrientes está fuertemente condicionada por las propiedades físico-químicas de los suelos, dado que éstas regulan la distribución de los mismos entre las distintas fracciones. Entre estas propiedades se encuentran la reacción del suelo, concentración de carbonato de calcio, capacidad de

intercambio catiónico, concentración de otros nutrientes en la solución del suelo, contenido de materia orgánica y textura (Álvarez *et al.*, 2006).

3.14. MOVILIDAD DE LOS NUTRIENTES EN EL SUELO BAJO FERTIRRIEGO

La movilidad de los iones en el suelo es importante porque condicionan el manejo de la nutrición de un cultivo. Las fuerzas que regulan esta distribución son la convección y la difusión, y la distribución será muy diferente cuando un nutriente no es absorbible, como el nitrato, de otros nutrientes sujetos a fuerzas de retención por los coloides del suelo, como los fosfatos y sulfatos (aniones) o potasio calcio y magnesio (cationes). Para el caso de los primeros la concentración aumenta a medida que nos acercamos al frente de humedecimiento del bulbo húmedo. Mientras que los segundos su distribución dependerá de la cantidad y la fuerza de los sitios de adsorción (INTA, 2015).

3.15. DIAGNÓSTICO DE FERTILIDAD EN SUELOS

El éxito en el manejo de la fertilidad del suelo depende en gran medida de la oportunidad y precisión con que se aplique un programa de diagnóstico del estado nutrimental. El diagnóstico de la fertilidad del suelo permite identificar problemas de carácter nutrimental, así como no nutrimentales, que pudiesen estar afectando, o que pudiesen afectar en el futuro, el crecimiento y el desarrollo de un cultivo (Alcántar y Trejo, 2007).

Existen varios tipos de análisis químicos de suelo o análisis de fracciones que se emplean habitualmente para diagnosticar la capacidad de suministro nutrimental para los cultivos que exhiben los suelos, el empleo de una fracción del elemento presente en el suelo como indicador de disponibilidad sólo se puede emplear si, con anterioridad, se ha demostrado que tal fracción se relaciona con lo que la planta puede absorber (estudio de correlación) (Alcántar y Trejo, 2007).

La fracción soluble de los elementos presentes en el suelo se puede medir de diferentes maneras (Alcántar y Trejo, 2007):

- a) Directamente, extrayendo de la solución de suelo por procedimientos *ad hoc* (como los llamados sondas de succión o chupatubos, estas son, cápsulas porosas que se entierran en el suelo a una profundidad deseada y a través de la cual penetra a una oscuridad interior la solución del suelo en equilibrio con la fase sólida de éste); este sistema es empleado en sistemas fertirrigados tanto en campo como en camas de invernadero).
- b) Extrayendo la solución de equilibrio de una pasta de saturación preparada a partir de suelo seco al aire, llamada extracto de saturación.
- c) En una solución acuosa obtenida por extracción del suelo seco al aire, empleando diversas relaciones suelo: solución.

En estos medios es posible analizar la concentración de cualquier elemento esencial si se dispone de un método apropiado. La fracción soluble, da una idea directa de la concentración de un elemento en la solución del suelo, es decir, del factor intensidad del nutrimento. La fracción soluble es altamente dinámica y nos da idea de la capacidad de abastecimiento potencial o factor de capacidad que exhiben los suelos. El que dicha fracción dé una idea de la capacidad actual de suministro de nutrientes, ha hecho este procedimiento popular en sistemas donde la nutrición puede ser fácilmente controlada, como es el caso de la fertirrigación y producción en invernaderos, así como en otras circunstancias en que se trabaja en medios de alta concentración nutrimental donde no es importante contabilizar la capacidad de abastecimiento nutrimental que pudiese hacer el suelo al cultivo (Mendieta, 2011).

3.16. LISÍMETROS DE SUCCIÓN O CHUPATUBOS

El cultivo protegido en suelo constituye un ambiente complejo, pues cuando una determinada dosis de nutriente se suministra a la plantación es muy difícil de estimar la proporción de ella que pasa a la CIC. Por tales motivos, el análisis de la solución del suelo constituye el intermediario nutritivo entre el complejo absorbente y la

planta y permite conocer la interacción que se produce entre la solución fertilizante y el sustrato (Zapata *et al.*, 2004).

El análisis de la solución del suelo se logra a partir de la colocación de las sondas de succión que permiten cuantificar, in situ, la composición química de la solución en contacto con las raíces (Salas *et al.*, 2009).

El estudio de la solución de suelo permite establecer el índice de demanda de nutrientes básicos, de manera que su aporte en la solución fertilizante real y el contenido en la solución de suelo a diferentes profundidades nos ofrezca una orientación de la demanda y disponibilidad de estos nutrientes. Asimismo, también indica de manera aproximada el índice de lixiviación de un determinado nutriente y los riesgos de contaminación, como es el caso de los fertilizantes nitrogenados para optimizar el manejo de la fertilización nitrogenada (Granados *et al.*, 2005).

La extracción mediante sondas de succión es un método no destructivo tanto para la estructura del suelo como para el sistema radicular de las plantas y permite la obtención de muestras en condiciones de subsaturación (Van der Ploeg y Beese, 1997).

IV. JUSTIFICACIÓN

La evaluación de la calidad actual de los suelos es una actividad fundamental para poder monitorear variaciones negativas o positivas del sistema, para lo cual, se hace necesario identificar posibles procesos de degradación o mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas por causas diversas.

Tomar decisiones oportunas frente a posibles deterioros de la calidad de los suelos, requiere hacer el monitoreo de sus características físicas, químicas, biológicas a través del tiempo, para lo cual es necesario implementar un sistema de evaluación integral que permita mediante sus resultados detectar problemas y posteriormente llevar a cabo acciones correctivas dirigidas hacia la conservación del recurso suelo.

De acuerdo a Ferreras *et al.*, (2009), “Estimar la calidad de los suelos es importante puesto que contribuye a establecer la sostenibilidad de los diferentes sistemas de manejo”. Muchos países han establecido políticas de conservación y protección de los suelos para salvaguardar la producción de alimentos, a pesar de esto se observa en el mundo que los suelos continúan siendo degradados a través de la salinización, erosión, descertificación, pérdida de actividad biológica y acumulación de componentes tóxicos. (Bezdice *et.al.*, 1996).

La evaluación y monitoreo de los indicadores de la calidad de los suelos permiten detectar a tiempo procesos de degradación, para de esta forma hacer gestión ambiental y tomar oportunamente las mejores decisiones para un mejoramiento de calidad del suelo.

Por otro lado, la importancia del proyecto es la concientización de proteger el medio ambiente para lograr una mayor sostenibilidad ambiental, generando la conservación de los recursos naturales, para lo cual se hace evaluar el estado actual de los suelos del terreno “La cerona” Texcoco, Edo. México y llevar a cabo un monitoreo sobre las condiciones de calidad actual en las que se encuentra.

4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de la principal problemática de un suelo degradado, es principalmente por los factores que son determinados por indicadores de calidad del suelo que incluyen componentes de sus propiedades físicas, químicas, y biológicas dentro de límites establecidos por el clima y ecosistemas relacionados entre sí, es por ello que se debe tomar suma importancia para obtener un suelo de calidad, por lo que disminuyen la producción en los cultivos de diversos modos (USDA, 1975), alterando sus propiedades químicas, físicas y biológicas.

El suelo se ve afectado donde existe el uso de pesticidas y herbicidas al igual por desechos industriales y domésticos (basura) lo cual afecta de manera directa las características físicas y químicas del suelo, lo que provoca efectos en la producción; por otro lado la degradación del suelo tanto (física y química), se evidencia en una

reducción de la cobertura vegetal, la disminución de la fertilidad, la contaminación del suelo y del agua, así como también el empobrecimiento de las cosechas. Las principales causas de la degradación incluyen la erosión hídrica, la aplicación intensa de agro químicos, excesos de nitrógeno y fosfatos en la que estos pueden infiltrarse en aguas subterráneas o ser arrastrados a cursos de agua. Esta sobrecarga de nutrientes en las que puede provocar la eutrofización de lagos, embalses y estanques y da lugar a una explosión de algas que suprimen otras plantas y animales acuáticos.

Es por ello que se busca una solución a este tipo de contaminación en un suelo a partir de diversos indicadores de calidad, en el que existen varios tipos de análisis químicos de suelo o análisis que se emplean para diagnosticar la capacidad de suministro nutrimental para los cultivos que presentan los suelos, ya que la fluctuación del nivel freático en los suelos del Ex Lago de Texcoco es una problemática para la agricultura desde que se ha establecido en estos terrenos, ya que no solo afecta el drenaje subterráneo sino también a la movilidad y dinámica de los nutrimentos que se aportan al suelo para la nutrición de los cultivos agrícolas. Es por eso la importancia del presente proyecto ya que se tiene como finalidad analizar la dinámica nutrimental en un perfil de suelo con problemas de fluctuación del nivel freático durante el año, haciendo las determinaciones a través del método de extracción de la fracción soluble y disponible de los nutrimentos en el suelo.

V. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad del suelo en un sistema agrícola intensivo bajo fertirriego en invernadero a través de la determinación de Nitrógeno y Fósforo

5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ❖ Caracterizar el suelo del cultivo intensivo bajo fertirriego, en invernadero de acuerdo a sus propiedades físico – químicas.
- ❖ Diagnosticar la fertilidad del suelo de acuerdo a los parámetros óptimos para el cultivo.
- ❖ Evaluar la calidad del suelo con base a los resultados obtenidos.
- ❖ Proponer un conjunto de indicadores para evaluar la calidad del suelo en un sistema agrícola intensivo bajo fertirriego en invernadero.

VI. HIPÓTESIS

- ❖ El conjunto de indicadores propuestos representan adecuadamente la calidad del suelo de un sistema agrícola intensivo.

VII. METODOLOGÍA

7.1. PROCEDIMIENTO Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS.

7.1.1. LOCALIZACIÓN

El proyecto se realizó en el campo experimental “La cerona” en el invernadero con un área de 5,000 m² en la localidad de Boyeros perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo en el municipio de Texcoco, Estado de México; con coordenadas de 19° 29'N y 98°53'O y una altitud de 2,252 m; en donde se llevaron a cabo las prácticas de campo, así como también se realizaron los análisis de las muestras obtenidas en el Laboratorio de Análisis Químico del Departamento de Suelos y en el Laboratorio Central de nutrición vegetal DEIS para su análisis y obtención de datos experimentales de la Universidad Autónoma Chapingo (Fig. 7 y 8).

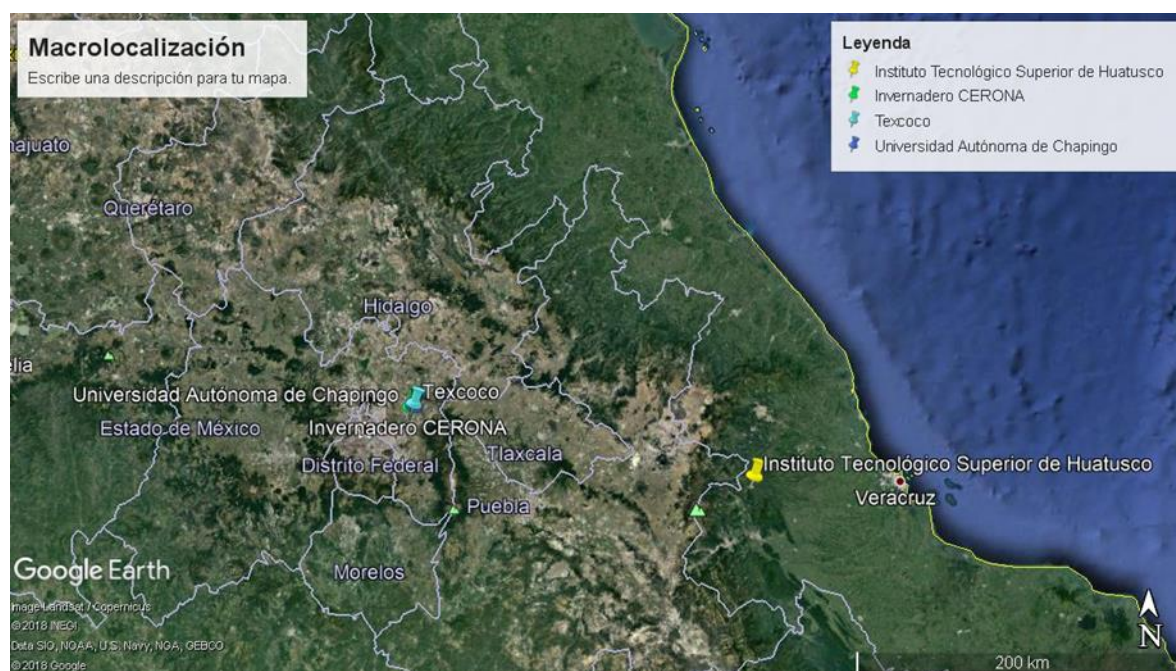


Figura 7. Macro localización de la realización de práctica en campo.

Fuente: Elaboración propia

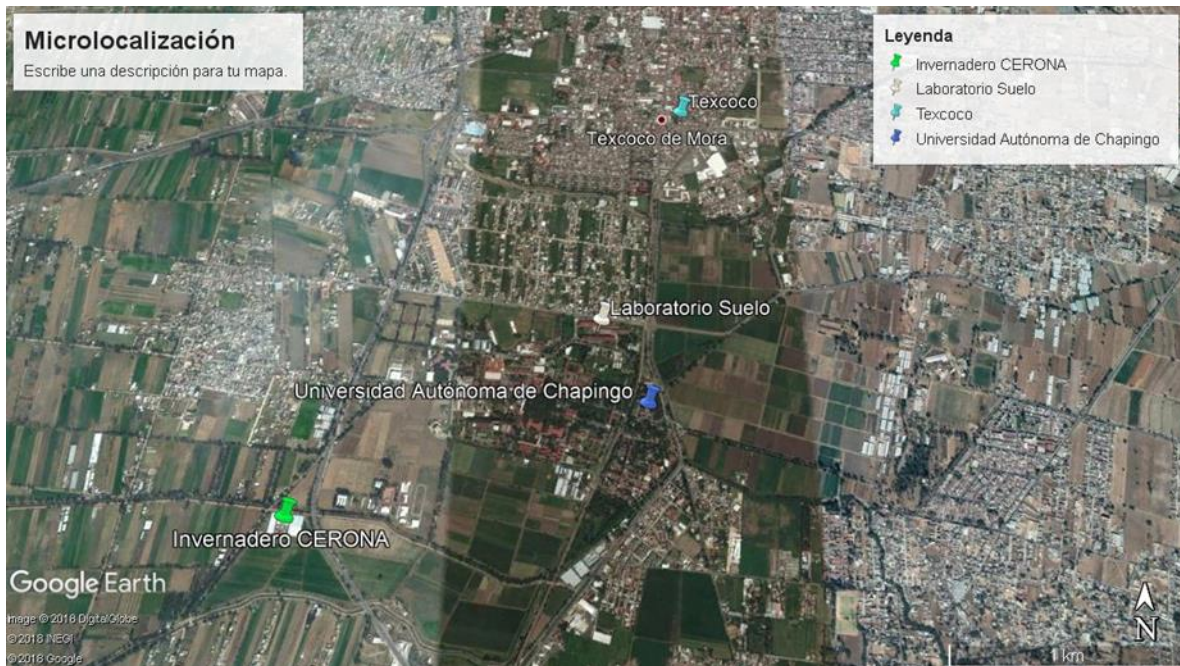


Figura 8. Micro localización de la realización de análisis de suelo.

Fuente: Elaboración propia.

7.1.2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO.

Para evaluar la calidad del suelo, se realizó la medición de parámetros químicos. Entre los que se determinaron los fosfatos y el nitrógeno total (Kjeldahl), a partir de la descripción del perfil del suelo, identificando sus horizontes y propiedades en concentraciones del (N y P).

7.1.3. MUESTREO

Para la obtención de las muestra se recorrió el terreno para así poder abarcar todos los sectores fig. 9 y 10, tomando sub-muestras, en la que se muestrearon cuatro perfiles de suelo, cada uno ubicado de forma representativa de los cuatro sectores que comprende el invernadero, se excavaron cada uno de tal manera hasta llegar al nivel del manto freático; la profundidad de estos oscilaba entre los 100 a 130cm de suelo hasta llegar al espejo de agua (fig.15).

Días después se drenó el agua de cada perfil de suelo, por lo que se delimitaron por horizontes, fig. 11, 12,13 y 14; así como también se tomaron 15 kg de suelo por cada uno en la que se pusieron en macetas de plástico y fueron llevadas al laboratorio para su posterior análisis. (Fig.16).



Figura 9. Invernadero del área a analizar



Figura 10. Recorrido de terreno



Figura 11. Pozo pedológicos perfil 1



Figura 12. Delimitación de perfil 2



Figura 13. Perfil de suelo 3.



Figura 14. Perfil de suelo 4.



Figura 15. Representación de manto freático



Figura 16. Recolección de muestras por horizontes y perfiles.

7.1.4. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Para la realización de las determinaciones de las muestras, se extrajo primero la fracción soluble y disponible del suelo a través del método siguiente:

- a) Directamente, extrayendo la solución de suelo con las llamadas sondas de succión o chupa tubos.
- b) Las muestras se acomodaron y se etiquetaron, la cual fueron 16 macetas del suelo muestreado organizándolas por número de horizonte y perfil.
- c) Todas las muestras se llevaron a capacidad de campo con agua destilada, se colocaron tubos SSAT (chupa tubo o lisímetro de succión) en cada una de

las macetas, con ayuda de una bomba de succión se fue generando dentro del tubo un vacío aproximadamente de 60 a 70 centibares para la acumulación del lixiviado. La solución del suelo se extraía al otro día por lo que se dejaba 24hrs, por lo cual se extraía y se transportaba a un frasco previamente etiquetado y se mantenía en refrigeración hasta su análisis.

- d) Después de la extracción de la solución, las muestras de suelo eran llevadas siempre a capacidad de campo con agua destilada y con la ayuda de un tensiómetro con el que se monitoreaba la humedad del suelo.

7.1.5. ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS.

Se determinó el análisis de fertilidad al suelo; empleando relaciones en el suelo: solución, las soluciones obtenidas mediante sondas de succión. En el análisis se determinó la concentración de N, y P.

7.1.6. MANEJO DE MUESTRAS

En el análisis de fertilidad donde se usan diversas relaciones suelo: solución, la determinación del contenido de N se realizó por el método micro-Kjeldahl donde es extraído con KCl_2N y destilado mediante arrastre de vapor en presencia de MgO . El contenido de P se determinó por el método de Olsen para suelos alcalinos por espectrofotometría. (NOM-021-RECNAT-2000).

Las determinaciones en las soluciones extraídas mediante sondas de succión se realizaron directamente sobre el extracto obtenido por este método empleando la técnica anterior, pero sin la preparación previa del suelo.

7.1.7. ANÁLISIS DE DATOS

En Excel office se realizó la correlación de métodos a través de un análisis de regresión lineal simple para cada parámetro determinado.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La finalidad de llevar a cabo este proyecto fue evaluar, analizar, así como disminuir el bajo rendimiento en cuanto a fertilidad en los suelos, por medio de un análisis de calidad de suelo para determinar los factores que están influyendo en la pérdida de calidad y bajo rendimiento de producción, así como también regularizar la fertilidad en el suelo a partir de la determinación de las propiedades analizadas para conocer qué tan fértil o infértil se encuentra el suelo para obtener un mejor crecimiento de productividad en áreas de cultivo que se ven afectadas por la infertilidad, al igual la restauración ambiental es decir recuperación de suelo, así como también dar a conocer el impacto que se está presentando en cuanto pérdidas de producción y no solo en cuanto ese factor si no la gran problemática que se está causando en el desgaste de este recurso ya que es un factor muy importante y de larga recuperación.

Thompson *et al.*, (2006) señalan que es necesario el monitoreo del NO_3^- con el objetivo de evitar el exceso y la posible contaminación producida por nitratos de origen agrícola. Por su parte Zapata *et al.*, (2004) plantean que no solo es importante diagnosticar un exceso de N en suelo, pues una baja concentración puede ser indicativo no solo de una deficiencia de N, sino también de un excesivo régimen de riego con peligros de lixiviación y contaminación de las aguas subterráneas.

Como ya antes mencionado en la metodología la concentración de N total se obtuvo por el método de micro- Kjeldahl modificado para incluir nitratos, de acuerdo al procedimiento del laboratorio de Suelos. La extracción de nitrato y amonio, del suelo se realizó con KCl_2N y su destilación por arrastre de vapor en presencia de MgO , en la que se expresó en ppm. Una vez obtenidos los datos del análisis de amonio nitratos y nitrógeno total se realizó un análisis gráfico en Excel que a continuación se describe.

ESTÁNDARES PARA LA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para los resultados obtenidos en sondas de succión no cuentan con estándares establecidos para su interpretación, por lo que para poder clasificar dichos valores nutrimentales, se aplicaron los modelos generados por Sonneveld & Voogt (2009) (Tabla 4) quienes generaron ecuaciones para transformar valores de nutrimentos leídos en extracto de pasta de saturación a valores en solución de suelo.

Tabla 4. Modelos para transformar valores nutrimentales en extracto de saturación a valores en solución de suelo, Sonneveld y Voogt (2009).

Determinación	Ecuación de regresión	r
CE	$Y = 1.6x - 0.18$	0.958
NH ₄	$Y = 1.33x - 0.01$	0.844
K	$Y = 1.54x - 0.64$	0.984
Na	$Y = 1.62x - 0.42$	0.978
Ca	$Y = 1.53x + 1.03$	0.946
Mg	$Y = 1.67x + 0.02$	0.943
NO ₃	$Y = 1.82x - 0.27$	0.954
Cl	$Y = 1.99x - 0.66$	0.975
SO ₄	$Y = 1.16x + 2.76$	0.926
P	$Y = 1.20x - 0.03$	0.954

Y = Concentración en la solución del suelo, x = concentración en el extracto de saturación (mM).

Como referencia se utilizaron los estándares de clasificación generados por Burgueño (1995) y Castellanos (2004) (Tabla 5 y 6, respectivamente) para extracto de saturación, con los cuales se generaron estos nuevos estándares (Tabla 7 y 8) para interpretar los análisis obtenidos en solución de suelo a través de sondas de succión (chupatubos).

Tabla 5. Niveles nutrimentales y relaciones entre algunos nutrimentos en el extracto de pasta de saturada en cultivos con fertirriego, Burgueño (1995).

		DE:	A:
pH		6.5	6.5
CE	(dS·m ⁻¹)	1.8	2.5
K	(me·L ⁻¹)	0.9	2.5
Ca	(me·L ⁻¹)	5	9
Mg	(me·L ⁻¹)	3	5
N-NO ₃	(me·L ⁻¹)	3	8
P-PO ₄	(me·L ⁻¹)	4	6
S-SO ₄	(me·L ⁻¹)	4	8
CO ₃	(me·L ⁻¹)	0	
HCO ₃	(me·L ⁻¹)	2.5	5
Relaciones			
NO ₃ /K		2.2	2.5
K/Ca		0.2	0.3
Ca/Mg		1.3	2.5
K/Mg		0.2	0.4

Tabla 6. Niveles nutrimentales en pasta de saturación (Castellanos, 2004)

	Muy bajo	Bajo	Moderadamente bajo	Medio	Moderadamente alto	Alto	Muy alto
K (me·L ⁻¹)	< 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4	4 - 5	> 5
Ca (me·L ⁻¹)	< 1	1 - 3	3 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20
Mg (me·L ⁻¹)	< 1	1 - 2	2 - 3	3 - 5	5 - 8	8 - 10	> 10
NO₃ (me·L ⁻¹)	< 2	2 - 3	3 - 5	5 - 8	8 - 12	12 - 14	> 14
P-PO₄ (mgL ⁻¹)	< 0.5	0.5 - 1	1 - 2	2 - 3	3 - 5	5 - 10	> 10
CE (dS·m ⁻¹)	< 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.5	2.5 - 4.0	4.0 - 5.0	> 5
RAS	< 1	1 - 2	2 - 3	3 - 5	5 - 7	7 - 9	> 9
Na (me·L ⁻¹)	< 2	2 - 3	3 - 5	5 - 8	8 - 10	10 - 15	> 15
Cl (me·L ⁻¹)	< 1	1 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 10	10 - 15	> 15
HCO₃ (me·L ⁻¹)	< 0.5	0.5 - 1	1 - 2	2 - 4	4 - 8	8 - 12	> 12
CO₃ (me·L ⁻¹)	< 0	0 - 0	0 - 0	0.0 - 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	> 1

Tabla 7. Clasificación de niveles nutrimentales en la solución del suelo para sondas de succión obtenidos con los modelos de Sonneveld y Voogt (2009) a partir de valores en extracto de saturación reportados por Castellanos (2004).

	Muy bajo	Bajo	Moderadamente bajo	Medio	Moderadamente alto	Alto	Muy alto
CE (dS·m ⁻¹)	< 0.6	0.6 - 1.4	1.4 - 2.2	2.2 - 3.8	3.8 - 6.2	6.2 - 7.8	> 7.8
K (mg·L ⁻¹)	< 5.1	5.1 - 35.2	35.2 - 65.3	65.3 - 125.5	125.5 - 215.8	215.8 - 276.0	> 276.0
Ca (mg·L ⁻¹)	< 71.9	71.9 - 133.3	133.3 - 194.6	194.6 - 347.9	347.9 - 501.2	501.2 - 654.5	> 654.5
Mg (mg·L ⁻¹)	< 20.8	20.8 - 41.1	41.1 - 61.4	61.4 - 101.9	101.9 - 162.8	162.8 - 203.4	> 203.4
Na (mg·L ⁻¹)	< 64.9	64.9 - 102.1	102.1 - 176.6	176.6 - 288.4	288.4 - 362.9	362.9 - 549.2	> 549.2
N-NO ₃ (mg·L ⁻¹)	< 47.18	47.18 - 72.66	72.66 - 123.62	123.62 - 200.06	200.06 - 301.98	301.98 - 352.94	> 352.94
SO ₄ (mg·L ⁻¹)	< 320.6	320.6 - 376.3	376.3 - 487.7	487.7 - 599.0	599.0 - 821.8	821.8 - 1100.2	> 1100.2
Cl (mg·L ⁻¹)	< 47.2	47.2 - 117.9	117.9 - 259.2	259.2 - 400.4	400.4 - 683.0	683.0 - 1036.2	> 1036.2
P (mg·L ⁻¹)	<--	... - 0.27	0.27 - 1.47	1.47 - 2.67	2.67 - 5.07	5.07 - 11.07	> 11.07

Tabla 8. Contenido nutrimental en solución de suelos para sondas de succión manejados bajo fertirriego obtenidos con los modelos de Sonneveld y Voogt (2009) a partir de valores en extracto de saturación reportados por Burgueño (1995).

Intervalo adecuado	
CE (dS·m ⁻¹)	2.7 - 3.8
K (mg·L ⁻¹)	29.09 - 125.19
Ca (mg·L ⁻¹)	194.2 - 316.6
Mg (mg·L ⁻¹)	61.36 - 101.9
N-NO ₃ (mg·L ⁻¹)	72.67 - 200
P (mg·L ⁻¹)	3.87 - 6.27
SO ₄ (mg·L ⁻¹)	663 - 1109

Tabla 9. Resultados obtenidos en la determinación de los parámetros en el suelo por perfiles de acuerdo a los sectores analizados.

SECTOR	PERFIL DE SUELO	AMONIO	NITRATO	NITROGENO TOTAL	FÓSFORO
A2	Horizonte 1	18.55	31.26	49.81	2.5
	Horizonte 2	17.96	28.93	46.9	0.43
	Horizonte 3	21.7	23.1	44.8	0.76
	Horizonte 4	21	28.23	49.23	0.36
A5	Horizonte 1	9.1	86.33	95.43	1.8
	Horizonte 2	7.7	104.65	112.35	0.7
	Horizonte 3	13.12	67.9	81.02	0.1
	Horizonte 4	10.03	37.8	47.83	0.1
B2	Horizonte 1	18.2	136.32	154.52	2.63
	Horizonte 2	19.25	48.53	67.78	0.33
	Horizonte 3	21.7	31.15	52.82	0.2
	Horizonte 4	18.2	36.4	54.6	0.6
B5	Horizonte 1	17.5	98.7	116.2	2.03
	Horizonte 2	17.03	33.25	50.28	0.56
	Horizonte 3	20.66	34.3	54.36	0.16
	Horizonte 4	26.6	23.8	50.4	0.46

8.1. REPRESENTACIÓN GRÁFICO POR PERFILES DE (N)

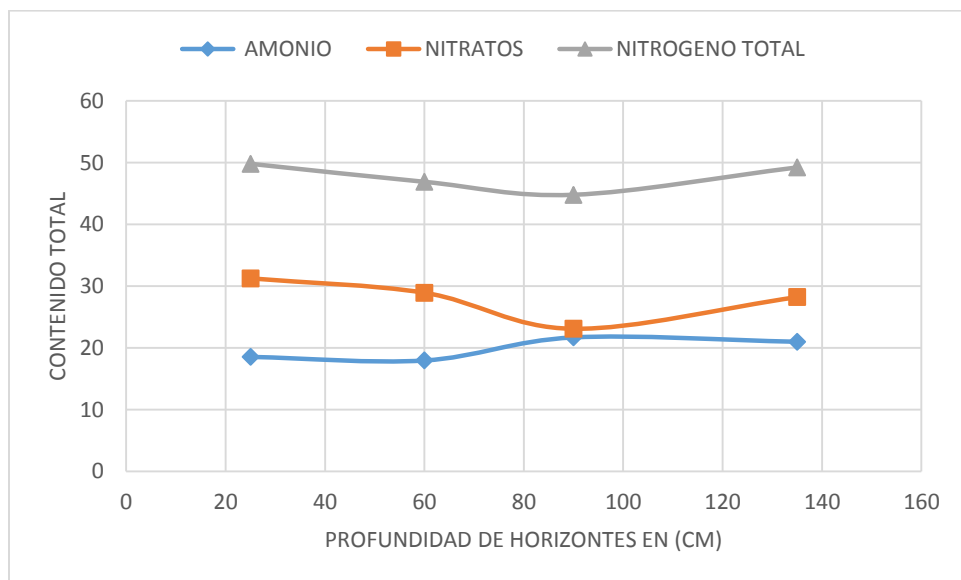


Figura 17. Concentración de amonio, nitratos y Nitrógeno total perfil 1.

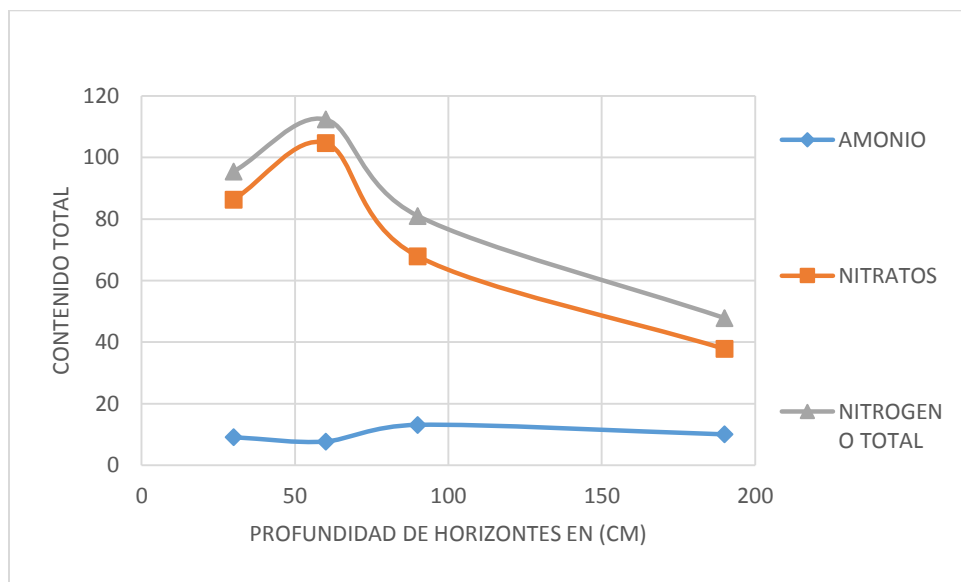


Figura 18. Concentración de amonio, nitratos y Nitrógeno total perfil 2.

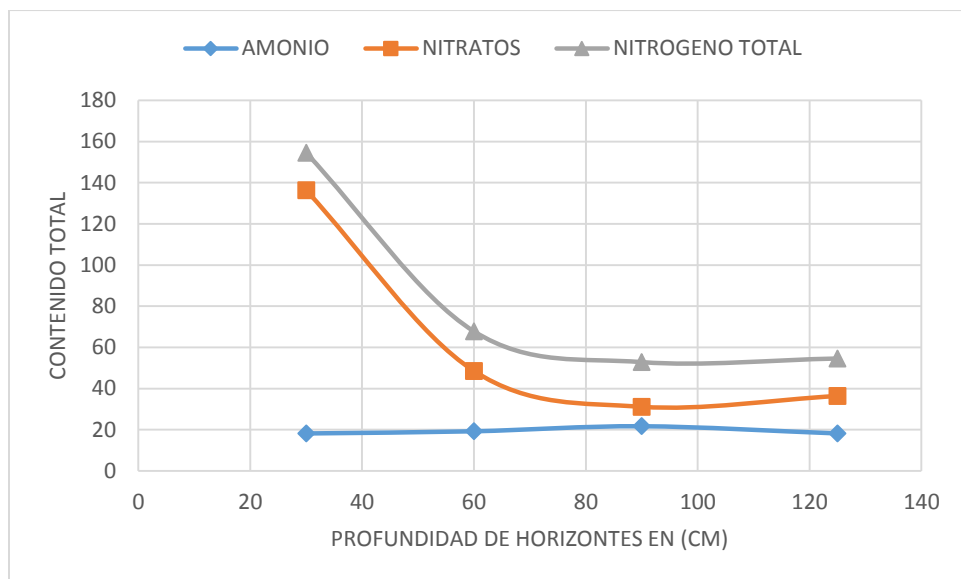


Figura 19. Concentración de amonio, nitratos y Nitrógeno total perfil 3.

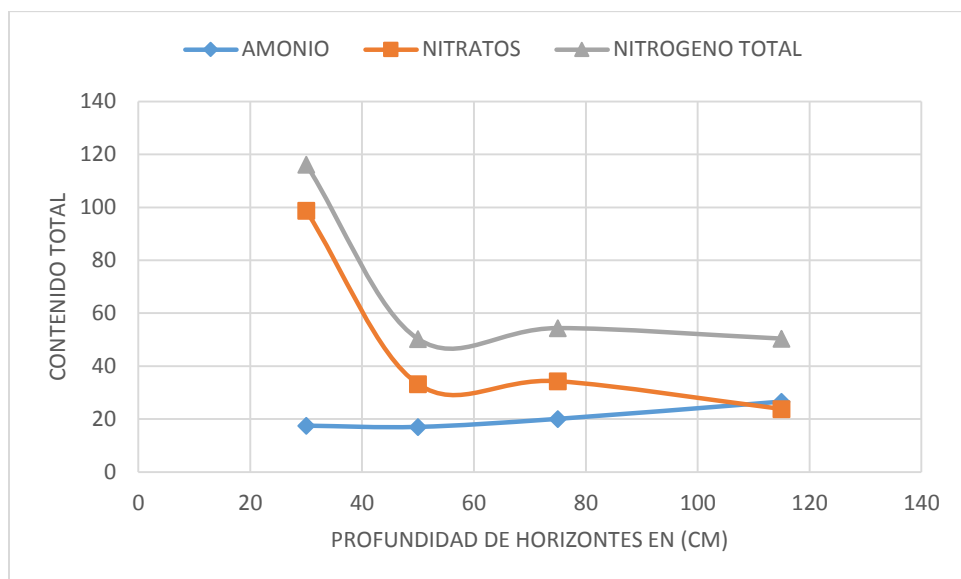


Figura 20. Concentración de amonio, nitratos y Nitrógeno total perfil 4.

8.2. NITRÓGENO TOTAL

Como se puede observar en las figuras 17, 18, 19 y 20 el comportamiento de las concentraciones de Nt en función de los horizontes de un manejo convencional fue similar, es decir, en la parte superficial los cuatro perfiles analizados mostraron una

concentración alta que tiende a incrementarse de acuerdo al nivel de horizonte en el que se encuentra cada uno, ya que estos varían en la profundidad de los 30cm; disminuyendo a los 60cm, así como también se observa que estos se mantienen casi constantes en las profundidades de los 90 a 190cm. Se aprecia que en los perfiles varia la concentración debido a la escorrentía ya que cada uno de ellos no tiene la misma pendiente o inclinación.

8.2.1. NITRATO (NO_3^-)

En las figuras 17, 18, 19 y 20. Se observa que en el manejo convencional la concentración de nitratos fue menor en la capa superficial, por lo que fue incrementándose en los primeros horizontes que va de los 30 a los 60cm y a partir de ahí se deduce que a mayor profundidad es menor la concentración lo que denota un menor proceso de lixiviación, esto se debe a que el NO_3^- es altamente dinámico y las pérdidas por lixiviación pueden ser afectadas por varios factores (Kaluli *et al.*, 1999). Las principales causas son 1) transformaciones de N en el suelo. 2) dinámica de la absorción de N por parte del cultivo, 3) manejo de riego y la fertilización nitrogenada. Cuando el riego excede la evapotranspiración, existe un riesgo potencial de lixiviación.

8.2.3. AMONIO (NH_4^+)

Como se puede observar en las figuras 17, 18, 19 y 20. El comportamiento del amonio en el manejo convencional en función a la profundidad, de manera general no es similar ya que en los primeros perfiles va de los primeros 30cm, se puede ver una ligera disminución, aumentando en el segundo perfil que va de los 60cm, posteriormente conforme el horizonte es más profundo el amonio va disminuyendo, como se observa a partir del tercer perfil a los 90cm en donde la concentración de este disminuye. De manera general el comportamiento del amonio en función de la profundidad se justifica considerando que no es tan móvil puesto que su carga positiva evita que se lixivie, es por eso que conforme aumenta la profundidad el amonio se retiene en el suelo y su concentración disminuye.

8.3. FÓSFORO (P)

El contenido de Fósforo se obtuvo a partir del método Olsen para suelos alcalinos por espectrofotometría para su extracción de fracción disponible y soluble en el suelo, así como para su interpretación se requiere una correlación fig. 21, ya que su determinación de este en el suelo se debe interpretar de una manera muy precisa.

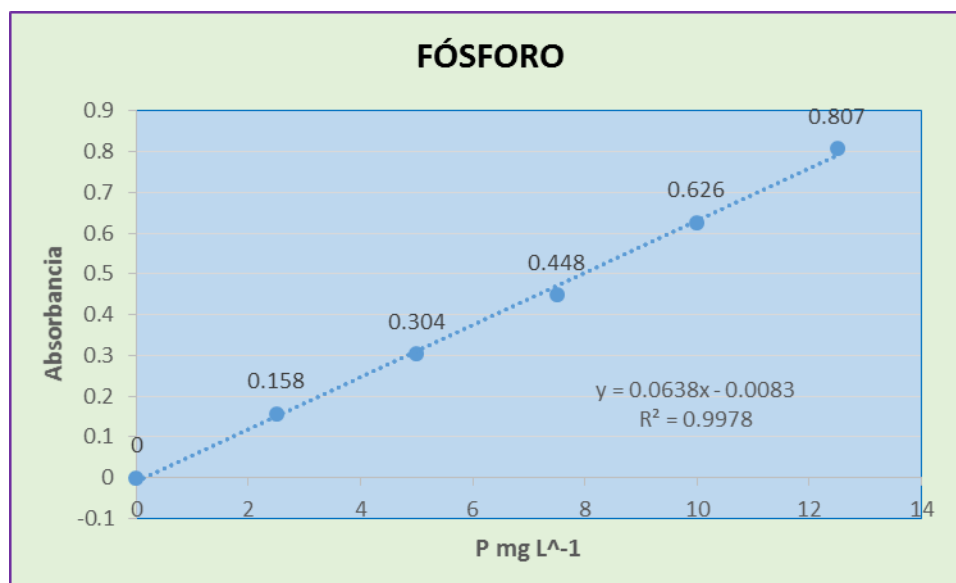


Figura 21. Correlación de la concentración de P (mg·L⁻¹).

De acuerdo con Tisdale *et al.*, (1977) el fósforo tiene el coeficiente de difusión más bajo de todo los nutrientes, lo cual lo ubica como el elemento menos móvil en el suelo en comparación con los demás nutrientes. Por tal motivo, el acceso del P hacia las raíces ocurre principalmente por interceptación y difusión (INPOFOS, 1999).

Como se muestra en la fig.22, en el análisis realizado por medio de la solución extraída mediante sondas de succión el primer horizonte se clasificó como bajo, mientras que los tres restantes como moderadamente bajos en cualquiera de los perfiles analizados. Estadísticamente hablando se presentó diferencia significativa entre el primer horizonte y el resto de los mismos, observándose en general que los mayores valores de fósforo se encuentran dentro del primer horizonte donde muy

probablemente se deba al fertirriego, por lo que demuestra la poca movilidad del fósforo.

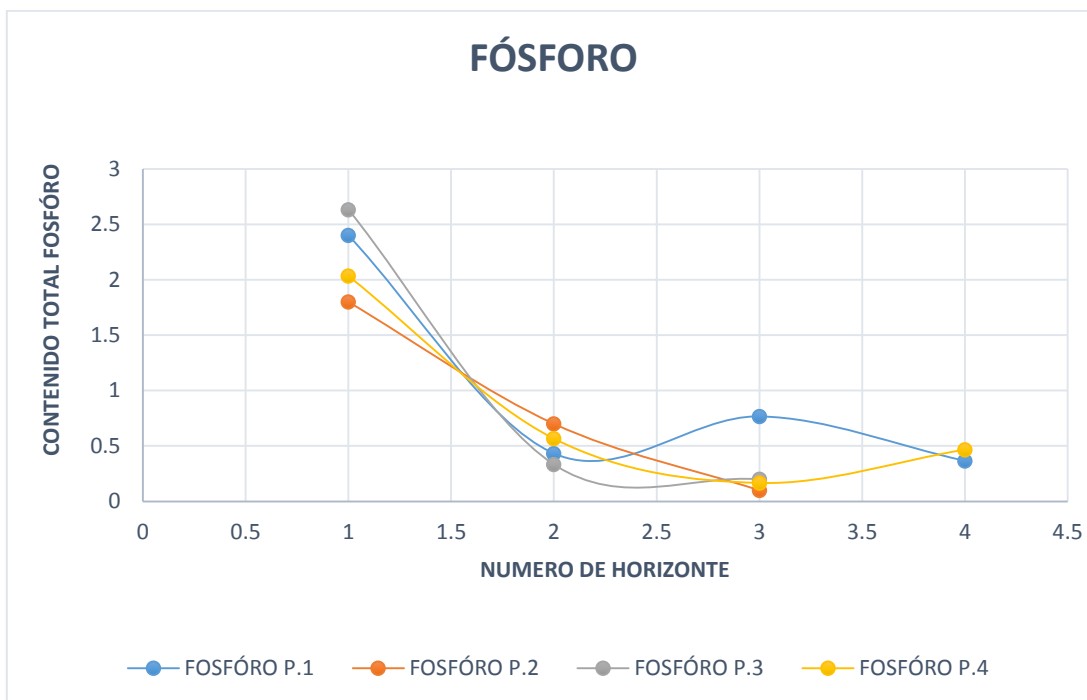


Figura 22. Concentración de Fósforo en los cuatro perfiles.

8.4. MANTO FREÁTICO

Un análisis de fluctuación en los niveles freáticos subterráneos son de mucha importancia debido a el movimiento en los mantos freáticos ya que es una de las principales causas de problemas de salinidad y drenaje. En México se estima que existen aproximadamente 1.1 millones de hectáreas afectadas por salinidad y drenaje inapropiado a diferentes grados (SEMARNAT, 2008).

La salinización puede surgir a través de un número de mecanismos definidos e independientes, como pueden ser elevación de la napa freática debido a la excesiva infiltración de canal y/o la aplicación en el terreno y la salinización freática e incluso la movilización de aguas subterráneas poco profundas naturalmente salinas (Foster y Shah, 2012).

La salinización de los recursos hídricos es un fenómeno de suma importancia, con efectos graves para la sostenibilidad del riego que la misma salinización de los suelos. En los últimos años se ha demostrado que los elementos tóxicos, como Se, Mo y As en las aguas procedentes del drenaje agrícola pueden provocar problemas de contaminación que representan una gran amenaza para la supervivencia del riego en algunos proyectos (Letey *et al.*, 1964; citados en Rhoades, 1993).

En el muestreo realizado también se tomaron muestras del manto freático presente en cada uno de los perfiles, en la que se determinó N y P para determinar el estado en que se encuentra fig.23, Tabla.10.

Tabla 10. Resultados obtenidos de los diferentes parámetros en el manto freático del suelo.

PERFIL	PROFUNDIDAD	AMONIO	NITRATO	NITRÓGENO TOTAL	FÓSFORO
1	135cm	9.8	22.63	32.43	1.2
2	190cm	5.36	21.23	26.6	0.2
3	125cm	5.13	2.8	7.93	0.53
4	115cm	5.25	0	5.25	0.33

Según las características y criterios de calidad de agua para uso agrícola con base en Uvalle (2005). Las cantidades de nitrógeno en el agua se localizan en una categoría de segunda clase, en una clasificación regular y con un nivel de daño moderado para las plantas, los contenidos encontrados de fósforo son bajos.

para el caso del nitrógeno donde las cantidades halladas aun no presentan un daño grave y desde el punto de vista de la nutrición de los cultivos, la presencia de nitrato en el agua de riego podría ser benéfico, en el uso del agua para consumo humano a partir de 1 meq·L-1 pueden presentar problemas para la salud.

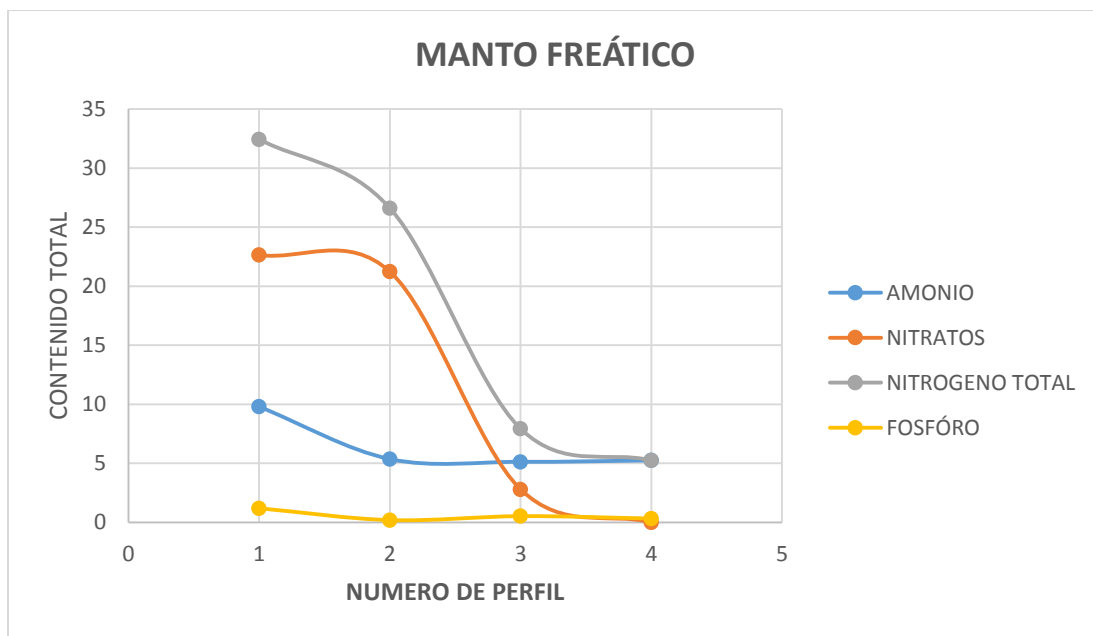


Figura 23. Representación gráfica de los parámetros obtenidos en el manto freático.

IX. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La evaluación de la calidad de suelo es una herramienta fundamental que permite evaluar la sustentabilidad de las prácticas de manejo agrícolas y pecuarias, tanto a corto como a mediano y a largo plazo. Dicha evaluación se realiza por medio de la medición y del seguimiento en el tiempo de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, en el que un indicador es una propiedad, característica o proceso representativo que puede ser medido para detectar cambios en el sistema estudiado.

Los indicadores permiten desarrollar e implementar políticas de mejoramiento o conservación de suelos, manteniendo o mejorando su calidad, a la vez de revertir y contrarrestar aquellos procesos que han conducido a una degradación; Por ende, la protección de este recurso natural debe ser una política nacional e internacional, para lograr lo anterior y al mismo tiempo, un manejo adecuado del suelo, es necesario contar con indicadores físico – químicos que permitan evaluar su calidad. El desarrollo de tales indicadores debe hacerse con base en las funciones del suelo que se evalúan; considerando aquellas propiedades edáficas sensibles a los cambios de uso del suelo, dicha medición de la calidad del suelo mediante los indicadores que permite entender cómo evoluciona el estado (capacidades y propiedades) del mismo bajo determinados sistemas de manejo, particularmente para una agricultura sustentable. A diferencia que se considera al suelo como fuente de nutrimentos y sostén para las plantas cultivadas, el concepto calidad de suelos ubica a este recurso como el centro de procesos ambientales a todos los niveles.

De acuerdo al estudio realizado el Nitrógeno en general se encontró en niveles altos, con una tendencia de lixiviación en comparación a un segundo horizonte del perfil según el análisis realizado por medio de sondas de succión, en la parte superficial los cuatro perfiles mostraron una concentración alta debido a que tiende a incrementarse de acuerdo al nivel de horizonte en el que se encuentra cada uno ya que estos varían en la profundidad.

En base a la interpretación de datos se deduce que a mayor profundidad es menor la concentración lo que denota un menor proceso de lixiviación, esto se debe a que el nitrato NO_3^- es altamente dinámico y las pérdidas por lixiviación pueden ser afectadas por diversos factores.

El comportamiento de amonio NH_4^+ en función de la profundidad se justifica considerando que no es tan móvil puesto que su carga positiva evita que se lixivie, es por eso que conforme aumenta la profundidad el amonio se retiene en el suelo y su concentración disminuye.

La solución extraída mediante sondas de succión el fósforo se encontró en concentraciones altas en el primer horizonte, pero con mayor valor dentro de este donde probablemente se debe al fertirriego por su poca movilidad.

Se recomienda que se instalen sondas de succión con cultivos presentes y en zonas representativas en un invernadero a estudiar; esto con la finalidad de no tener variabilidades en las que dificulte su interpretación de los datos, así como también muestrear y monitorear cada determinado tiempo el suelo y solución del suelo, así como aumentar el número de repeticiones para el mismo método esto con el fin de que las correlaciones establecidas resulten más precisas.

Se recomienda monitorear constantemente Nitrógeno y fósforo debido a que son uno de los nutrientes más absorbidos y esenciales en el suelo, con la finalidad de evitar acumulaciones, para así mantener niveles adecuados de micro nutrientes y evitar toxicidades en la que se recomienda realizar los análisis correspondientes para cada uno, para tener un mayor control de las cantidades que se aportan al suelo y por tanto al cultivo.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrociencia, vol. 36, núm. 5, septiembre-octubre, 2002, pp. 605-620
Colegio de Postgraduados Texcoco, México.
- Alcántar González, G., & Trejo Téllez, L. I. (2007). *Nutrición de Cultivos*. México: Múndi Prensa México S.A. de C.V.
- Álvarez, J., López Valdivia, L., Novillo, J., Obrador, A., & Rico, M. (2006). Comparasion of EDTA and sequential extraction test for phytoavailability prediction og manganese and zinc in agricultural alkaline soils. *Soil Science*, 132, 450 - 463.
- Ángel frowen cedeño sacón, m.sc. Calceta, julio. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en el área de investigación, innovación y desarrollo de la espam- mfl.
- Association, C. P. (2004). *Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento*. D.F., México: Limusa S.A. DE C.V.
- Astier Calderón, Marta; Moreno, Manuel; Etchevers Barra, Jorge Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable
- Ávila, M. F. (2012). *Dinámica nutrimental en suelo y ajuste del programa de fertirriego en jitomate usando extractores de solución*. Chapingo, Texcoco , Edo. de México, México: Universidad Autónoma Chapingo (Tesis licenciatura).
- Baker, A., & P.L. Walker. (1989). *Physiological responses of plants toheavy metals and the quantification of tolerance and toxicity*. (Vol. 1). Chem. Special. Bioavailab.
- Buol, W., Hole F., D., & McCracken R., J. (1981). *Génesis y Clasificación de Suelos*. Ames, Iowa, E.U.A.: Trillas S.A.

- Burgueño, H. (1995). La fertigación en cultivos hortícolas con acolchado plástico. Culiacan, Sinaloa, México: BURSAG, S.A de C.V.
- Cadahía, L. (2005). *Fertirrigación, Cultivos hortícolas, frutales y ornamentales*. Madrid, España.: Ediciones Mundi-Prensa.
- Castellanos , J. Z. (2004). Manual de producción hortícola en invernadero (2da. ed.). INTAGRI SC.
- Castellanos, J. Z, Uvalle, J. X., & Aguilar, A. (2000). *Manual de interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. Celaya, Guanajuato: INCAPA.
- Corcuera M., C.E. 2016. Análisis de la fertilidad de los suelos agrícolas destinados al cultivo de arroz en la cuenca baja del río Jequetepeque.
- Departamento de Agricultura, FAO. (Enero de 2015). *Depósito de documentos de la FAO*. Recuperado el 20 de agosto de 2016, de <http://www.fao.org/docrep/006/x8234s/x8234s08.htm>.
- Dra. Lourdes Flores Delgadillo, Téc. Jorge René Alcalá Martínez., Manual de Procedimientos Analíticos Laboratorio de Física de Suelos 2010.
- Espinoza, L., N. Slaton, & M. Mozaffari. 2006. Understanding the Numbers on Your Soil Test Report. University of Arkansas.
- FAO. (1999). *Base referencial mundial del recurso suelo*. Roma, Italia.: FAO.
- Fassbender W, H. (1987). *Química de suelos con énfasis en América Latina*. San Jose, Costa Rica: IICA.
- Garrido V., S. 1993. Interpretación de análisis de suelos.

- Granados , M., Thompson , R., Fernández, M., Gallardo, M., & Gázquez, J. (2005).
Uso de sondas de succión para el manejo de la fertilización nitrogenada en
el cultivo de tomate bajo condiciones de invernadero.
Publicaciones de Cajamar, <http://www.publicacionescajamar.es/series-tematicas/centros-experimentales-las-palmerillas/uso-de-sondas-de-succion-para-el-manejo-de-la-fertilizacion-nitrogenada-en-un-cultivo-de-tomate-bajo/>.
- Guardián Torrez, J. L. (2010). *Validación de una sonda de lixiviación como método para determinar la fertilidad del suelo en el cultivo de café (coffea arabica), en la Escuela Agrícola Panamericana (EAP), Honduras*. Escuela Agrícola Panamericana, Carrera de Ciencia y Producción Agropecuaria. Zamorano, Honduras: EAP (Tesis licenciatura).
- Gutiérrez Castorena, M., Stoop G., G., & Ortiz Solorio, C. A. (1998). Carbonato de Calcio en los suelo del Ex lago de Texcoco. *TERRA*, 16(1), 91. Obtenido de <http://chapingo.mx/terra/contenido/16/1/art11-19.pdf>
- Havlin , J., Beaton, J., Tisdale, S., & Werner L., N. (2005). *Soil Fertility and Fertilizers and Introduction to Nutrient Management*. United States of América: Pearson.
- Honorato, R.P(2000) Manual de Edafología, editorial Alfaomega, pp.89, 91- 123, 124. México
- INPOFOS. (1997). *Manual internacional de fertilidad de suelos*. U.S.A.: Potash & Phosphate Institute.
- INTA. (29 de Enero de 2015). *Fertilizando*. Obtenido de <http://www.fertilizando.com/articulos/el%20ambiente%20edafico%20bajo%20fertirriego.asp>

- Kaluli, J. W., Madramootoo, C. A., Zhou, X., Mackenzie, A. F. And Smith, D. L. (1999) SUBIRRIGATION SYSTEMS TO MINIMIZE NITRATE LEACHING. J. Irrig. Drain. Eng. 125 (2): 52-58.
- Kass, D. C. (1998). *Fertilidad de suelos*. San José, Costa Rica: EUNED.
- Martínez, H. S. (2010). *Análisis espacial geostadístico para caracterizar la salinidad de los suelos del Ex-lago de Texcoco, México*. Chapingo, Texcoco, Edo. de México (Tesis licenciatura).
- Mendieta Muñoz, L. A. (2011). Distribución espacial de nutrimentos en la solución del suelo para la producción intensiva de fresa. Tesis de Maestría. Montecillo, Texcoco, Edo. de México., México: Colegio de Postgraduados (Tesis maestría).
- Mercado Fernandez, T., Ortega Escobar, M., Arenas Tawil, A., & Combatt Caballero, E. (2011). Dinámica de sales en el distrito de riego La Doctrina, Colombia. *Scientific Electronic Library Online*, 83-90.
- NOM-021-RECNAT 2000. (31 de Diciembre de 2002). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 22 de Abril de 2015, de Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo. Estudios, muestreo y análisis.: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2009). Guía para la descripción de suelos. Roma, Italia. FAO.
- Ortiz V. B., O. S. (1980). *Edafología*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Porta C. J., L.-A. R. (2003). *Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente*. Madrid: Mundi-Prensa.

- Prasad, R., & Power, J. (1997). *Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture*. United States of America: Lewis Publishers.
- Rodriguez, R., Moreno, J., Díaz, J & Larreal, M. (octubre de 2006). Comportamiento de la conductividad eléctrica en dos series de suelo del sector Caño San Miguel, municipio Mara, estado Zulia durante un periodo de dos años. *SCIELO*, 395-406. Obtenido de: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182006000400003
- Salas, M., Vargas , J., & Sánchez-Romer, J. (2009). Using suction cup to improve the monitoring of soil solution in a greenhouse fertigated crop. *Acta Horticulturae*, 807: 301-306.
- Shuman, L. (1979). Zinc, Maganese and copper in soil fractions. *Soil Science*(1), 10 - 17.
- Sonneveld, C., & Voogt, W. (2009). *Plant nutrition of greenhouse crops*. Netherlands: Springer.
- Tar buck J., E., & Lutgens K., F. (11 de Noviembre de 2015). *Rutas Geológicas*. Obtenidode:http://www.rutageologica.cl/index.php?option=com_content&view=article&id=393&Itemid=95&limitstart=3.
- Thompson, L. M. (1980). *Los Suelos y su Fertilidad*. España: Reverté,S.A.
- Thompson, R. B., Martínez, C., Fernández, M. D., López-Toral, J. R., Gallardo, M., & Giménez, C. (2006). Management factors contributing to nitrate leaching loss from a greenhouse-based intensive vegetable production system. *Acta Horticulturae*, 700: 179-184.
- Tisdale, S., & Nelson, W. (1977). *Fertilidad de los Suelos y Fertilizantes*. Nueva York, EE.UU.: The Macmillan.

USDA. (1975). *Principios de avenamiento y drenaje*. México: Diana S.A.

Valencia R, C. R. (2011). Estudio edafológico y agrológico con fines de planificación agropecuaria en la hacienda “la valencia” ubicada en la parroquia pintag, cantón quito, provincia de pichincha. Escuela politécnica del ejército, Sangolquí.

Van der Ploeg , R. R., & Beese, F. (1997). Model calculation for the extracting of soil water by ceramic cups and plates. *Soil Science Society of American Journal*, 41, 466-70.

Zapata, A., Cano, D., & Rojo, J. (2004). Correlación de medias obtenidas a partir de sondas de succión y extracto de saturación de suelo regado con aguas salinas. (F.p. agua, Ed.) *Ingeniería del Agua*, 11(3), 329-338.