



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**ESTADO DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS ESENCIALES
EN SUELOS DE LOS SISTEMAS BOSQUE NATURAL,
AGROFORESTAL Y MONOCULTIVO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES**



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

Paul Rene Fernández Ojeda

CHAPINGO, MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2015



Tesis realizada por Paul Rene Fernández Ojeda, bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR



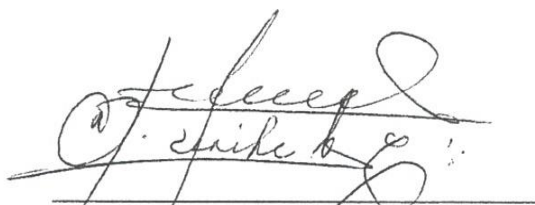
Dr. David Cristóbal Acevedo

ASESOR



Dr. Antonio Villanueva Morales

ASESOR



Dr. Miguel Uribe Gómez

Chapingo, México. Septiembre de 2015

A la Familia, a la Vida,
el Amor, la Libertad
y lo bonito de compartir
con todos ellos este logro...

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres, porque todo lo que logré en esta vida fue gracias a ellos.

A mis hermanos Erika y Cuauhtémoc, que estuvieron a mi lado en las buenas y en las malas.

A Judith, por ser parte de mi vida.

A mi familia, por su apoyo en este largo viaje.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar los estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, y especialmente al programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo, mi más sincero agradecimiento por brindarme su apoyo y dirección en el presente trabajo.

Al Dr. Antonio Villanueva Morales y al Dr. Miguel Uribe Gómez, quienes sin sus saberes y amistad este trabajo no se hubiese podido realizar.

A mis compañeros de la maestría, quiero agradecer todos y cada uno de los buenos momentos que pase, y ellos también hacen parte de este logro.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Paul Rene Fernández Ojeda. El segundo de tres hijos. La madre Isabel Ojeda Ramos y el padre Celerino Fernández Márquez.

Fecha de Nacimiento: 01 de Agosto de 1983

Lugar de Nacimiento: San José de Gracia, Municipio de Molcaxac, Estado de Puebla, México

CURP: FEOP830801HPLRJL01

Profesión: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

Desarrollo académico

Bachillerato: Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 79, Puebla. 1998-2001

Licenciatura: Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Autónoma Chapingo, México. 2001-2006

Maestría: Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, México. 2013-2015

RESUMEN

Estado de los elementos químicos esenciales en suelos de los sistemas bosque natural, agroforestal y monocultivo

State of the essential chemical elements in soils of natural forest agroforestry and monoculture systems

Fernández-Ojeda, P. y Cristóbal-Acevedo, D.

RESUMEN

Los sistemas agroforestales son una alternativa para la producción agrícola y forestal de México. La pérdida de recursos naturales se da por la necesidad de producción de alimentos, para satisfacer la demanda de la población, aumentando la frontera agrícola y reduciendo los periodos de barbecho. El objetivo de este trabajo fue estudiar el estado de propiedades como la densidad aparente (DAP), capacidad de campo (CC), punto de marchitamiento permanente (PMP), materia orgánica (MO), N inorgánico, N total, P, bases intercambiables, microelementos, pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC), en un suelo con bosque natural, dos sistemas agroforestales y un monocultivo; para determinar la eficiencia nutrimental de sus suelos, ubicados en el municipio de Huatusco, Veracruz. Respecto al monocultivo, los suelos de cafetales y del bosque manifestaron una disminución de la DAP y de la acidez del suelo, un aumento de los concentraciones de MO, N y de los porcentajes de CC y PMP. El valor de la CIC fue muy alto en todos los sistemas. En el caso de los suelos donde se tuvo mayor concentración de MO, la CIC se incrementó. La calidad química del suelo relativa a las concentraciones de P y K fue menor en bosque que en cafetales, en oposición a la concentración de N. La humedad aprovechable fue alta en todos los sitios y la DAP tuvo un comportamiento inverso a las concentraciones de MO, por lo que el suelo fue un buen sustrato para las plantas. En consecuencia, el ambiente químico de los suelos estudiados demostró tener una adecuada disponibilidad de diversos nutrimentos. Los sistemas agroforestales ofrecieron condiciones edáficas similares a las del bosque y mostraron una tendencia en el aumento de la fertilidad, con respecto al monocultivo.

Palabras claves: acidez del suelo, cafetal, materia orgánica, nitrógeno.

ABSTRACT

Agroforestry systems are an alternative for agricultural and forestry production in Mexico. The loss of natural resources is given by the need for food production to meet the demand of the population, increasing the agricultural frontier, and reducing fallow periods. The goal of this work was to study the state of properties such as apparent density (DAP), field capacity (CC), permanent wilting point (PMP), organic matter (OM), inorganic N, total N, P, bases interchangeable, microelements, pH and cation exchange capacity (CEC) in a natural forest two agroforestry and monoculture, to determine the nutritional efficiency of their soils, located in the municipality of Huatusco, Veracruz. Regarding monoculture coffee soils and forest they showed a decrease in DAP and soil acidity, increased concentrations of OM, N and percentages of CC and PMP. The value of the CEC was very high in all systems. In the case of soils where higher concentration of OM is held, the CEC increased. The chemical quality of the soil on the P and K concentrations were lower in forest than in coffee, as opposed to the concentration of N. The soil moisture was high in all sites and the DAP had an inverse behavior concentrations OM, so the floor was a good substrate for plants. Consequently, the chemical environment of the soils studied proved to have an adequate supply of various nutrients. Agroforestry systems offered similar to forest soil conditions and showed a trend of increasing fertility, compared to monoculture. Keywords: soil acidity, coffee plantation, organic matter, nitrogen.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE CUADROS	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Definición de sistemas agroforestales (SAF)	4
2.2. La Agroforestería como una opción de desarrollo	6
2.3. El suelo	8
2.3.1. Calidad de suelo.....	10
2.4. Propiedades del suelo	12
2.4.1. Propiedades físicas.....	13
2.4.2. Propiedades químicas	18
2.5. Producción de café en México.....	32
2.5.1. Los sistemas de producción de café en Veracruz, México	34
2.6. Bosque húmedo de montaña o bosque mesófilo de montaña	36
3. MATERIALES Y MÉTODOS	37
3.1 Descripción del área de estudio.....	37
3.2 Descripción de los sistemas de producción.....	38
3.3 Selección de parcelas	40
3.4 Variables evaluadas.....	41
3.5 Propiedades físicas del suelo	41
3.6. Propiedades químicas del suelo	42
3.6 Modelo estadístico	42
3.7 Análisis de datos	43
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1. Propiedades físicas	44
4.1.1 Densidad Aparente	45
4.1.2 Humedad en el suelo.....	48
4.2. Propiedades químicas	50

4.2.1 pH	51
4.2.2 Capacidad de Intercambio Catiónico	53
4.2.3 Materia Orgánica	55
4.2.4 Nitrógeno total.....	58
4.2.5 Nitrógeno Mineral	60
4.2.5 Fosforo	62
4.2.6 Bases intercambiables	65
4.2.8 Microelementos	69
5. CONCLUSIONES	74
6. LITERATURA CITADA	76
7. ANEXOS	88
Anexo 1. Análisis de varianza para todas las variables evaluadas de los sistemas estudiados	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio.....	37
Figura 2. Localización de los sistemas de producción y el bosque.	40
Figura 3. Comportamiento de la densidad aparente (DAP, g cm ⁻³) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.....	46
Figura 4. Comportamiento de la humedad aprovechable, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (%) del suelo en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.	49
Figura 5. Comportamiento del potencial de hidrógeno del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.	52
Figura 6. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico (Cmol (+) Kg ⁻¹) del suelo en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.	54
Figura 7. Concentración de la materia orgánica (%) del suelo en los estudiados, en Huatusco Veracruz.	56
Figura 8. Concentración del nitrógeno total (%) del suelo en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.	59
Figura 9. Concentración del nitrógeno mineral (mg Kg ⁻¹) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.	61
Figura 10. Concentración del fósforo (mg Kg ⁻¹) del suelo en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.	63
Figura 11. Concentración de bases intercambiables (mg Kg ⁻¹) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.....	66
Figura 12. Concentración de los microelementos (Cu, Fe, Zn, Mn, mg Kg ⁻¹) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.....	69
Figura 13. Concentración del boro (mg Kg ⁻¹) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.	72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Metodologías utilizadas para las determinaciones de las propiedades físicas del suelo.	41
Cuadro 2. Metodologías utilizadas para las determinaciones de las propiedades químicas del suelo.	42
Cuadro 3. Textura del suelo perteneciente a los distintos sistemas estudiados (Bosque, SPCMA, SPCT y SCPS) a diferentes profundidades (0-10, 10-20, 20-30 cm).....	44
Cuadro 4. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de la densidad aparente, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.....	47
Cuadro 5. Prueba de comparación de medias de Tukey para capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente (% , $\alpha < 0.05$), en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.	50
Cuadro 6. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de potencial de hidrógeno con base en NOM-021-RECNAT-2000.....	52
Cuadro 7. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de capacidad de intercambio catiónico en base a la NOM-021-RECNAT-2000.	55
Cuadro 8. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de la materia orgánica en base a la NOM-021-RECNAT-2000.	57
Cuadro 9. Prueba de comparación de medias de Tukey, para materia orgánica (% , $\alpha < 0.05$), en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.	58
Cuadro 10. Interpretación del contenido de nitrógeno total, en base a la NOM-021-RECNAT-2000.	60
Cuadro 11. Clasificación de fertilidad de suelos en función del nitrógeno mineral, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.....	62
Cuadro 12. Criterios para determinar la calidad de un suelo en cuanto a su contenido de fósforo en base a la NOM-021-RECNAT-2000.....	64
Cuadro 13. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de las bases intercambiables, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.	67
Cuadro 14. Prueba de comparación de medias de Tukey, para potasio (mg Kg^{-1} , $\alpha < 0.05$), en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz, México.	67
Cuadro 15. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de micronutrientes, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.	70
Cuadro 16. Clasificación del suelo en cuanto a su valor del boro, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.	72
Cuadro 17. Prueba de comparación de medias de Tukey, para boro (mg Kg^{-1} , $\alpha < 0.05$), en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz, México.	73

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento integral se sustenta en el principio de que la naturaleza debe ser entendida como un todo, que los componentes agua, suelo, aire, plantas, animales y hombre, interaccionan entre sí y que las modificaciones a uno de ellos repercuten directa o indirectamente en el resto. Otro principio es que se debe aumentar la diversidad de componentes de la unidad de producción, plantas, animales y condiciones de producción, y el último principio argumenta que el suelo, el agua y el aire deben conservarse limpios y enfatizar su mejoramiento o reciclaje con prácticas diversas (Nair, 1997).

La pérdida de recursos naturales, se da por la necesidad de producción de alimentos para satisfacer la demanda de la población, aumentando la frontera agrícola, además de la reducción de los periodos de barbecho (Young, 1989).

El suelo es uno de los recursos más importantes para el ser humano al momento de la producción agropecuaria, su estado determina las actividades a realizar y los correctivos necesarios para alcanzar los niveles productivos deseados. Según USDA (1999), el suelo es un cuerpo natural comprendido por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases, que tiene la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural; haciendo del mismo el componente encargado de sostener la vida terrestre del planeta, por lo que su conservación debe ser prioritaria para productores y gobiernos.

Diversas propiedades físicas y químicas le confieren al suelo la calidad necesaria para albergar la vida y mantener la capacidad productiva de tierras agrícolas, funciones que se ven afectadas negativamente por fenómenos de degradación como la erosión y pérdida de componentes vitales como la fertilidad y la biodiversidad (UNCCD, 1996).

La agroforestería representa el arte y la ciencia de cultivar árboles en combinación interactiva con cultivos y/o animales en la misma unidad de tierra con propósitos múltiples, lo cual favorece una serie de efectos positivos sobre el suelo y por ende los cultivos que se encuentran en el sistema (Krishnamurthy y Ávila, 1999). Según Nair (1993), las arbóreas producen biomasa que mantiene y mejora los niveles de materia orgánica, algunas especies son fijadoras de nitrógeno, otras protegen contra la erosión generada por el agua y el viento, reduciendo así la pérdida de nutrimentos, a la vez que favorecen un aumento de la fertilidad del suelo, gracias a que pueden tomar nutrimentos de las capas más profundas del mismo, también pueden mejorar diferentes propiedades físicas, generar un microclima favorable bajo el dosel de los árboles y propiciar un incremento en la actividad realizada por los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica. No obstante, también existen efectos adversos que se generan con una mala planeación agroforestal, estos incluyen competencia por agua y nutrimentos, inhibición del crecimiento debido al exceso sombra y dificultad para realizar cosechas mecanizadas de cultivos (Mahecha, 2003).

En este estudio se trabajó con cuatro sistemas: un sistema natural, dos alternativas agroforestales y un monocultivo. Estos sistemas impactan de manera diferente al recurso suelo debido a las diferentes cubiertas vegetales presentes en cada uno de ellos. Estos impactos se ven reflejados en las propiedades físicas y químicas del suelo, teniendo como pregunta de investigación ¿cuál es el estado de los diferentes elementos esenciales y las propiedades básicas del suelo, para el desarrollo de los cultivos y árboles?

Se propusieron hipótesis para contrastar la capacidad de la agroforestería en comparación con el bosque y el monocultivo en mantener o incrementar la fertilidad del suelo y aumentar la eficiencia en la captura del carbono y fijación del nitrógeno. Por lo que esta investigación se propone para comprobar o refutar las afirmaciones que se generan en torno a la agroforestería, además de estudiar la variación de los elementos esenciales conforme aumenta la profundidad del suelo en estos sistemas.

El objetivo de este trabajo fue estudiar el estado de propiedades tales como la densidad aparente (DAP), la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitamiento permanente (PMP), materia orgánica (MO), N inorgánico (amonio, nitratos), N total, P, bases intercambiables, microelementos, pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en los sistemas; bosque natural, dos sistemas agroforestales con café y el monocultivo de café, para determinar la eficiencia nutrimental de sus suelos, ubicados en el Centro Regional Universitario de Oriente, que se encuentra en el municipio de Huatusco, Veracruz.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de sistemas agroforestales (SAF)

“La Agroforestería es un sistema sustentable de manejo de cultivos y de tierra que procura aumentar los rendimientos en forma continua, combinando la producción de cultivos forestales arbolados (que abarcan frutales y otros cultivos arbóreos), con cultivos de campo o arables y/o animales de manera simultánea o secuencial sobre la misma unidad de tierra, aplicando además prácticas de manejo que son compatibles con las prácticas culturales de la población local” (ICRAF, 1982).

La Agroforestería implica una serie de técnicas que incluyen la combinación, simultánea o secuencial, de árboles y cultivos alimenticios, árboles y ganado (árboles en los pastizales o para forraje), o todos los elementos. La Agroforestería incluye un conjunto de técnicas que implican una combinación de prácticas agropecuarias que se realizan en el mismo lugar y al mismo tiempo (prácticas simultáneas), o aquellas desarrolladas en el mismo sitio pero en épocas diferentes (prácticas secuenciales). El “sitio” puede ser tan pequeño como un simple jardín o una parcela cultivada, o tan extenso como un área de pastizal (Montagnini, 1992).

El objetivo de la mayoría de los sistemas agroforestales es de optimizar los efectos benéficos de las interacciones de los componentes boscosos con el componente animal o cultivo para obtener un patrón productivo que se compara con lo que generalmente se obtiene de los mismos recursos disponibles en el monocultivo, dadas las condiciones económicas, ecológicas y sociales predominantes (Nair, 1982).

Lundgren y Raintree (1983) proponen la definición de agroforestería como un nombre colectivo para los sistemas de uso de la tierra y tecnologías donde las perennes leñosas (árboles, arbustos, palmas, bambúes etc.) se usan deliberadamente en las mismas unidades de manejo de tierra con cultivos agrícolas y/o animales en alguna forma de arreglo espacial o secuencia temporal. Young (1990), define la ciencia agroforestal como un arreglo diferenciable del componente leñoso con cultivos, pastos o animales en el espacio y en el tiempo en una misma unidad de terreno.

Según Somarriba (1998), agroforestería es una forma de cultivo múltiple en la que se cumplen tres condiciones fundamentales: Al menos dos tipos de plantas que interactúan biológicamente, al menos uno de los componentes es una planta manejada con fines agrícolas (incluyendo los pastos), y al menos uno de los componentes es una especie leñosa perenne.

Krishnamurthy y Ávila (1999), definen la agroforestería como un sistema sostenido del manejo de la tierra que aumenta su rendimiento total, combina la producción de cultivos con especies forestales y/o animales en forma simultanea o secuencial sobre la misma superficie de terreno y aplica prácticas de manejo que son compatibles con las prácticas culturales de la población local.

2.2. La Agroforestería como una opción de desarrollo

La Agroforestería es una aproximación interdisciplinaria a los sistemas de uso de la tierra, implica tener conciencia de las interacciones y la retroalimentación entre hombre y el ambiente, entre la demanda de recursos y su existencia en una determinada área, lo cual bajo ciertas condiciones requiere optimización y administración esencial más que el incremento permanente de la explotación (Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Nair (1997), menciona que en estos sistemas existen interacciones ecológicas y económicas entre los componentes y conocer los sinergismos conduce a mejoras en un rango de características, tales como productividad y sostenibilidad, además de los beneficios ambientales no comerciales. Es sabido, que este tipo de sistemas juegan un rol ecológico en el que se destaca la función de mantenimiento de la biodiversidad en paisajes agrícolas deforestados; la reducción de la erosión y recuperación de suelos y praderas degradadas, por tanto la conservación y recuperación de la capacidad productiva del suelo; el mantenimiento de cantidad y calidad del agua, la absorción de carbono y reducción de las emisiones de gases de invernadero (Harvey *et al.*, 2003).

Los árboles en sistemas agroforestales cumplen funciones ecológicas de protección del suelo disminuyendo los efectos directos del sol, el agua y el viento (Fassbender, 1993, Montagnini *et al.*, 1999). También pueden modificar las características del suelo como su estructura, capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio (Young, 1989).

Muschler (2000), menciona que además de los beneficios ecológicos pueden generar ingresos adicionales por la producción de madera, leña y frutos.

La necesidad de proteger las tierras bajo cobertura forestal y la demanda por más tierras para la producción de alimentos y la ganadería justifica la agroforestería, ya que se concilian objetivos múltiples de producción y conservación a largo plazo, además de que tiene como objetivos principales aumentar los rendimientos y los productos obtenidos, así como la fertilidad del suelo, para mejorar el nivel de vida de los productores (Krishnamurthy y Ávila, 1999, Jiménez *et al.*, 2001).

Los impactos positivos de la agroforestería se pueden traducir en: búsqueda de la seguridad alimentaria en las comunidades rurales, autosuficiencia productiva, conservación de recursos naturales, reducción de la presión y degradación de ecosistemas naturales, organización comunitaria a través de procesos de autogestión (Nair, 1993).

El componente arbóreo en un sistema agroforestal también puede tener efectos adversos sobre el suelo si no se lleva a cabo un diseño y una administración adecuada de las prácticas agroforestales. Nair (1997), cita algunos problemas relacionados a la mala administración de los árboles y destaca la pérdida de materia orgánica y nutrimentos en la cosecha de los árboles, competencia por nutrimentos entre los árboles y los cultivos cuando no se seleccionan bien los componentes del sistema.

A pesar de las ventajas aparentes que ofrece la agroforestería para los sistemas productivos, existen ciertas desventajas que limitan su implementación en campo, aunque la mayoría de estas se dan por errores al momento de

implementar el sistema. La principal y más importante es la competencia que se puede generar entre los componentes que integran cada arreglo agroforestal, ya que la agroforestería al incluir simultáneamente diversas especies vegetales en un solo lugar, presentan ciertos grados de competitividad que se dan por: raíces, agua, nutrimentos y luz (Ibrahim, 2010).

2.3. El suelo

El suelo puede definirse, de acuerdo con el glosario de la Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (1984), como el material mineral no consolidado en la superficie de la tierra, que ha estado sometido a la influencia de factores genéticos y ambientales (material parental, clima, macro y microorganismos y topografía), actuando durante un determinado periodo. Es considerado también como un cuerpo natural involucrado en interacciones dinámicas con la atmósfera y con los estratos que están debajo de él, que influye en el clima y en el ciclo hidrológico del planeta, y que sirve como medio de crecimiento para diversos organismos.

El suelo puede ser definido desde su forma más básica como un cuerpo tridimensional de materiales orgánicos e inorgánicos en proporciones variables, que se ha desarrollado como resultado de las interacciones entre material original, clima, topografía, y elementos bióticos, durante un periodo de tiempo variable; generalmente se encuentra constituido por horizontes que se han formado por diferentes fenómenos físicos, químicos y biológicos, cuyo proceso de formación es extremadamente lento, por lo que se le puede considerar como

un recurso no renovable (De la Rosa, 2008). No obstante, en él confluyen componentes bióticos y abióticos que hacen del suelo un sistema, por lo cual USDA (1999), lo define como un cuerpo natural comprendido por sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que se encuentra en la superficie de la tierra, ocupa un espacio, y es caracterizado por horizontes o capas, que son distinguibles del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia que tiene la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural.

Los suelos están compuestos por partículas minerales inorgánicas de arena, limo y arcilla, formas reactivas y estables de materia orgánica, grandes cantidades de organismos vivos como lombrices, insectos, bacterias, hongos, algas, nematodos, entre otros; agua, y gases como O_2 , CO_2 , N_2 y CH_4 . Los atributos físicos y químicos del suelo, regulan la actividad biológica e intercambio de moléculas, entre fases líquidas, sólidas y gaseosas, que influyen el ciclo de los nutrientes, el crecimiento de las plantas y la descomposición de materiales orgánicos; conjunto de componentes que hacen del suelo un sistema vivo, complejo y dinámico, que forma parte integral de los ecosistemas mayores, participando en procesos como el movimiento y transformación del agua, carbono y nutrientes, además de dinámicas tróficas de la biodiversidad (Lal, 1999; De la Rosa, 2008).

2.3.1. Calidad de suelo

Todos aquellos procesos desencadenados por las actividades humanas, como son el aumento de la población así como su migración hacia áreas urbanas y suburbanas, generan una serie de fenómenos que ejercen una presión constante hacia los suelos, reduciendo así su capacidad para sostener ecosistemas naturales o modificados, para mantener o mejorar la calidad del aire y el agua, y para preservar la salud humana (SEMARNAT, 2003). Dentro de dichos procesos se encuentran: (i) el cambio de uso del suelo, (ii) la generación de residuos (industriales y municipales), (iii) la sobreexplotación de recursos hídricos y de combustibles fósiles.

Altieri y Yurgevic (1991), mencionan que si se mantienen los principios ecológicos de los ecosistemas naturales, es probable que a largo plazo se produzca un mayor rendimiento para el agricultor ya que la calidad de los suelos está influenciada directamente por su administración.

A menudo todos los suelos agrícolas manifiestan algún tipo de degradación que puede ser física, química o biológica, comparados con suelos similares bajo vegetación natural, difícilmente son capaces de ofrecer un servicio ambiental de calidad y requieren de esfuerzos técnicos y económicos para conservar o restaurar sus funciones ambientales, sin embargo, los sistemas agroforestales son capaces de frenar el deterioro ambiental y conservar la fertilidad de los suelos (Young, 1989).

Para el caso de la agricultura migratoria el desmonte y la quema de la vegetación conduce a una disrupción de este ciclo cerrado de nutrimentos. Durante la operación de la quema, aumenta la temperatura del suelo. Esta variación de

cambio de temperatura tiene un efecto directo sobre la actividad biológica del suelo. La adición de ceniza cambia las propiedades químicas del suelo y en el contenido de la materia orgánica (Nair, 1997). Las bases intercambiables y el fósforo disponible aumentan después de la quema; los valores de pH también aumentan, aunque generalmente solo en forma temporal, también se espera que los contenidos de materia orgánica aumenten por los residuos de vegetación (Nair, 1984).

En un sistema suelo-planta, los nutrimentos de las plantas están en un estado continuo de transferencia dinámica. Estas los toman del suelo y los usan para procesos metabólicos. Algunas de sus partes, como raíces y hojas muertas retornan al sistema durante el crecimiento y dependiendo del tipo de uso de la tierra y de la naturaleza del desarrollo vegetal, diferentes porciones retornan en el momento de la cosecha, esta biomasa adicionada se descompone por acción de los microorganismos, y los nutrimentos que fueron utilizados por las plantas son devueltos al sistema, en donde quedan disponibles para su uso por parte de las mismas. En otras palabras, el reciclaje de nutrimentos involucra su transferencia continua al interior de diferentes componentes del ecosistema e incluye procesos como obtención de minerales, actividades suelo-biota y otras transformaciones que ocurren en la biosfera, atmósfera, litosfera e hidrosfera (Nair, 1993). De esta forma los sistemas agroforestales y otros sistemas basados en árboles tienen la ventaja de mejorar el reciclaje de nutrimentos ya que las leñosas perennes poseen la capacidad de extraer nutrimentos de las capas más bajas del suelo, para luego ser devueltos mediante aportes de materia orgánica que caen en forma de hojarasca, la cual se complementa con las excretas de los

animales, productos de las podas y residuos de pastoreo (Crespo, 2008). Adicionalmente, las raíces de las leguminosas son capaces de asociarse con bacterias del género *Rhizobium*, para captar nitrógeno atmosférico y hacerlo disponible para los cultivos de interés; esta fijación de nitrógeno puede alcanzar 200-500 Kg. N ha⁻¹ año⁻¹ (Giraldo, 2000; Pezo e Ibrahim, 2008).

2.4. Propiedades del suelo

Los constituyentes del suelo interactúan entre ellos para conferirle diferentes propiedades. El suelo es una mezcla de los componentes sólidos, líquidos y gaseosos y la adecuada relación entre estos componentes ayuda a mantener un buen desarrollo de las plantas además de un mejor aprovechamiento de los nutrientes.

En el suelo, el componente arbóreo influye en variables físico-químicas, biológicas y ambientales (Cardona y Sadeghian, 2004). Entre las variables físicas están; densidad, porosidad, humedad y compactación y en las químicas está el balance de nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico, pH, entre otras. Sin embargo, el impacto de los árboles sobre el suelo depende de las características de reciclaje de nutrientes, tales como la cantidad de hojarasca producida, su composición química y su tasa de descomposición (Montagnini *et al.*, 1999). Medir el impacto de los sistemas resulta ser muy complejo, uno de los indicadores ecológicos es el balance de nutrientes, que permiten conocer la dinámica de los ciclos de los nutrientes dentro del sistema para orientar el manejo de éstos y la minimización de las pérdidas.

2.4.1. Propiedades físicas

Dentro de las propiedades físicas del suelo está la textura que es la conformación de las partículas de diferentes tamaños, la estructura que es la forma de cómo están ordenados los agregados o peds, la firmeza con que se unen los materiales que lo componen conocida como la consistencia, densidad que refleja la cantidad de masa por unidad de volumen y el espacio poroso.

En los ecosistemas, el mantenimiento de la cobertura forestal favorece éstas propiedades por el sistema de raíces del componente arbóreo y la adición de la materia orgánica. Carter (2002), menciona que la materia orgánica es uno de los indicadores de calidad de suelos más usados en el mundo ya que influye directamente en la agregación del suelo, la estructura, la capacidad de retención de humedad, regulación del aire y conservación de nutrimentos. La compactación del suelo es “el proceso por el cual las partículas del suelo sufren un arreglo, aumentando el contacto entre sí mismas, disminuyendo el espacio poroso e incrementando la densidad aparente” (Soil Science Society of América, 1996). Teniendo efectos sobre los cultivos y sobre otras propiedades físicas del suelo, también modifica la cantidad de nutrimentos que pueden ser absorbidos por las especies vegetales. La densidad está en función del espacio poroso por la cantidad de materia orgánica y del origen de los suelos (Batey, 1990).

2.4.1.1. Textura

La textura del suelo se define como el porcentaje en peso del suelo mineral que queda comprendido entre varias fracciones de tamaño de partículas, las cuales son arena (2-0.05 mm), limo (0.05 – 0.002 mm) y arcilla (<0.002 mm). Diferentes porcentajes de estas fracciones se han combinado en las doce clases texturales del triángulo convencional de texturas. La baja relación superficie a volumen de la arena, la hace sumamente porosa al agua y con poca capacidad para absorber y almacenar los nutrimentos. El limo, aunque más fino que la arena se presenta también en granos con mayor capacidad de absorción de agua y nutrimentos. La arcilla corresponde a partículas coloidales que forman suspensión en agua, con gran capacidad de retención de iones de nutrimentos y moléculas de agua, como consecuencia de ello, la arcilla controla las más importantes propiedades del suelo, incluyendo la plasticidad y el intercambio de iones, no obstante, un suelo muy arcilloso puede tener problemas de drenaje y agrietarse en una condición seca. La mayoría de los suelos presentan una mezcla de las clases texturales, siendo los que contienen relativamente las mismas cantidades de arena, limo y arcilla (francos), los de mayor aptitud agrícola. Cuando la arena es el componente principal, los suelos presentan un buen drenaje y se cultivan con facilidad, aunque se secan rápidamente y los nutrimentos se pierden por lavado. Por otro lado, los suelos arcillosos tienden a drenar bien, se compactan con facilidad, no se cultivan fácilmente, pero a la vez presentan una buena retención de agua y nutrimentos. Diferentes tipos de cultivos se desarrollan mejor bajo diferentes texturas por lo cual establecer aquella que sea ideal, estará directamente relacionado con el tipo de sistema productivo que se desea implementar (De la Rosa, 2008).

2.4.1.2. Estructura

Las partículas del suelo se suelen agrupar en conjuntos de diferente forma y tamaño que se conocen como agregados y determinan la estructura del suelo, los principales tipos de estructura son: laminar, prismática, columnar, en bloques, granular y grumosa. La textura es el principal determinante de la estructura, junto con el contenido de materia orgánica, la humedad del suelo, las plantas soportadas, la presencia de organismos vivos y propiedades químicas como la salinidad y el tipo de arcilla. Cambios en la estructura del suelo, modifican la circulación de agua, la cual fluye rápido en suelos con estructura granular y se reduce a casi cero en suelos fuertemente compactados. En la práctica la estructura es esencial para los productores, ya que ayuda a entender la frecuencia y tipo de labores y maquinaria a utilizar (Gobat *et al.*, 2004; De la Rosa, 2008).

Dependiendo del contenido de humedad, los espacios del suelo están comúnmente ocupados por agua o aire, quienes en conjunto representan la porosidad, la cual otorga una idea de la condición estructural del suelo y se mide por la relación entre el volumen que ocupan los poros y el volumen total, expresada en porcentaje. Los poros incluyen las grietas que se desarrollan con la sequedad, los espacios entre partículas y agregados, huecos dejados por las raíces, entre otros. La estructura y la textura ejercen una fuerte influencia sobre la porosidad total, ya que determinan la relación existente entre macro, meso y micro poros (>50 , $50-0.2$ y <0.02 μm , respectivamente), los cuales brindan

información sobre las propiedades de retención de agua en el suelo; de esta manera, un suelo arenoso puede tener una porosidad total baja, pero la mayor proporción corresponde a poros grandes por donde se mueve con facilidad el agua y el aire, el porcentaje ocupado por poros pequeños en estos es bajo, lo que explica su reducida capacidad de retención de agua; contrario a esto, los suelos arcillosos tienen una mayor porosidad total correspondiente a una alta proporción de poros finos, favoreciendo una elevada retención de agua. Además del aire y el agua que se almacenan y mueven a través del espacio poroso, las raíces y microorganismos necesitan del mismo para vivir ya que el oxígeno presente es decisivo para el crecimiento radicular y la actividad microbiana, los cuales son altamente sensitivos al grado de anoxia (Gobat *et al.*, 2004; De la Rosa, 2008).

2.4.1.3. Densidad aparente

Se define como la masa contenida en la unidad de volumen que ocupa la muestra. La densidad aparente incluye el espacio poroso y el material sólido, tanto mineral como orgánico. La densidad aparente seca de un suelo da una indicación de la firmeza del suelo y con ella la resistencia que presentará a los implementos de labranza o raíces de las plantas cuando penetran en el suelo. A menor densidad aparente, mayor espacio poroso, es decir, se trata de un suelo menos compacto, por lo tanto la densidad aparente, es inversamente proporcional al espacio poroso. La densidad aparente es una propiedad afectada por factores como: la textura, materia orgánica, la consolidación, y la profundidad.

La densidad aparente varía de acuerdo al estado de agregación del suelo, al contenido de agua y la proporción del volumen ocupado por los espacios intersticiales, que existen incluso en suelos compactos. La densidad aparente es afectada por la porosidad e influye en la elasticidad, conductividad eléctrica, conductividad térmica, en la capacidad calorífica a volumen constante y en la dureza (Thompson y Troeh, 1980).

2.4.1.4 Humedad en el suelo

El agua es esencial para todos los seres vivos porque en forma molecular participa en varias reacciones metabólicas celulares, actúa como un solvente y portador de nutrimentos desde el suelo hasta las plantas y dentro de ellas. Además, intemperiza las rocas y los minerales, ioniza los macro y micronutrientes que las plantas toman del suelo, y permite que la materia orgánica sea fácilmente biodegradable. El contenido de agua en el suelo puede ser benéfico, pero en algunos casos también perjudicial. El exceso de agua en los suelos favorece la lixiviación de sales y de algunos otros compuestos; por lo tanto, el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas en el suelo (Topp, 1993).

Capacidad de campo (CC). Es el contenido de agua que contiene un suelo después que se saturó y dreno libremente por espacio de 24 a 72 horas después de una lluvia o riego (el contenido de agua continúa descendiendo a medida que pasa el tiempo, cuando más pesado el suelo, más demora en llegar a capacidad

de campo). Cantidad de agua retenida a una tensión de 0,1 a 0,33 bares. Depende del tipo de suelo, especialmente de su textura. En un suelo saturado todos los poros están ocupados por agua. En un suelo a capacidad de campo los macroporos perdieron agua y están llenos de aire, y los microporos están llenos de agua, la que es retenida contra la fuerza de gravedad. Este es el límite máximo de agua utilizable por las plantas, y representa el máximo nivel de bienestar hídrico para los cultivos (Silva *et al.*, 1988).

Punto de Marchitamiento Permanente (PMP). Es el contenido de agua que tiene un suelo cuando el cultivo extrajo toda el agua utilizable. En el suelo queda un cierto contenido de agua, pero tan fuertemente retenida que no es extraíble por el cultivo. El contenido de agua retenida a una tensión de 15 bares. Su valor depende del tipo de suelo. Este es el límite de tensión hasta el cual una planta, adaptada a condiciones medias de humedad, puede extraer agua. (Silva *et al.*, 1988).

2.4.2. Propiedades químicas

El suelo es una entidad química, todos sus materiales son sustancias que están compuestas por sólidos, líquidos y gases que pueden ser solubles o insolubles, así como orgánicos e inorgánicos; pueden ser iones y compuestos, sales, ácidos, bases, minerales y fragmentos de rocas, también existen coloides que son muy activos químicamente y son partículas muy finas de suelo en las que se incluyen humus, arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, que tienen cargas

eléctricas positivas y negativas, las cuales poseen iones que son intercambiados por iones similares en la solución de suelo, quienes junto con el pH y la capacidad de intercambio catiónico son propiedades químicas que influyen en la disponibilidad de nutrimentos para las plantas (Osman, 2013).

Dentro de las propiedades químicas de los suelos está el pH, los nutrimentos y la capacidad de intercambio catiónico. Young (1989) menciona que las prácticas agroforestales ayudan a mantener estas características fundamentalmente por la mineralización de la materia orgánica proveniente tanto de la parte aérea como el sistema de raíces, así la conservación de los suelos también está representada por la fertilidad de los mismos, siendo un aspecto fundamental para la productividad del sistema.

De esta manera, se producen tanto sustancias inorgánicas (en forma de aniones y cationes) como sustancias orgánicas, que pueden ser objeto de nuevos procesos de resíntesis y polimerización, formando ácidos húmicos, con características y propiedades químicas específicas (Fassbender, 1992).

2.4.2.1. pH

El pH es una propiedad química del suelo que tiene un efecto importante en el desarrollo de los seres vivos (incluidos microorganismos y plantas). La lectura de pH se refiere a la concentración de iones hidrógeno activos (H^+) que se da en la interface líquida del suelo, por la interacción de los componentes sólidos y líquidos. La concentración de iones hidrógeno es fundamental en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo. El valor de pH es el logaritmo del

recíproco de la concentración de iones hidrógeno, que se expresa por números positivos del 0 al 14. Tres son las condiciones posibles del pH en el suelo: la acidez, la neutralidad y la alcalinidad (Fassbender, 1982).

La acidez tiene varias fuentes: el humus o materia orgánica, arcillas aluminosilicatas, óxidos hidratados de Fe y Al, sales solubles y CO_2 . La materia orgánica o humus contiene grupos reactivos de carboxilo, fenólicos e imídicos que son capaces de ligar iones H^+ . Tales grupos saturados de H^+ se comportan como ácidos débiles y el H^+ ligado colateralmente se disocia, dependiendo de la constante de disociación del ácido formado (Ortiz, 1990). Así mismo este autor menciona que la acidez del suelo depende parcialmente de los procesos de nutrición de las plantas y el lavado e intemperización del suelo. Al realizar la fotosíntesis las plantas desprenden CO_2 por las raíces, esto forma el H_2CO_3 , y otros ácidos orgánicos en el suelo.

Según Fassbender (1982), el cambio en la acidez es cuantificado mediante la medición del potencial de hidrógeno, es una relación entre los contenidos de protones y de iones OH^- , por lo cual se cumple que en agua pura $\text{pH} + \text{pOH} = 14$; lo cual implica que una solución tendrá una condición neutra ($\text{pH} = \text{pOH}$) cuando su pH sea igual a 7. Diversos suelos incrementan su acidez mediante un proceso natural de acidificación, como resultado de la pérdida de bases por lavado a través del perfil, debido a la absorción de iones de nutrimentos por las plantas y la producción de ácidos orgánicos por las raíces y microorganismos. El rango de pH entre ligeramente ácido y ligeramente alcalino (6.0 – 7.5) se considera óptimo para la disponibilidad de nutrimentos por la mayoría de las plantas. Los efectos adversos suelen presentarse por debajo de 5.5 y por encima de 8, no obstante

cada cultivo tiene sus propios requerimientos (Jaramillo 2002; Gobat *et al.*, 2004; De la Rosa, 2008).

2.4.2.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Todas las moléculas, en mayor o menor medida, tienen minúsculas cargas eléctricas, positivas y/o negativas. Por ello, en el suelo actúan como pequeños imanes, formando entre ellas estructuras que pueden ser muy simples, como la atracción entre una partícula de arcilla cargada negativamente y una partícula de un fertilizante cargada positivamente; o muy complejas, como cuando hay la materia orgánica, con infinidad de cargas eléctricas de ambos signos. Este mecanismo actúa como un almacén de nutrimentos, tanto aniones como cationes. Los minerales de arcilla, específicamente las del tipo illitas y montmorillonitas, poseen una superficie cargada negativamente en donde los cationes como Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} son retenidos y por lo tanto, protegidos en contra del lavado. El contenido de arcilla es importante, debido a que estas pequeñas partículas tienen una relación alta de área superficial a volumen. Los diferentes tipos de arcillas presentan diferentes valores de la capacidad de intercambio catiónico. Las esmectitas tienen una mayor capacidad de intercambio catiónico (80-100 miliequivalentes 100 g^{-1}), seguida por illitas (15-40 meq 100 g^{-1}) y caolinitas (3-15 meq 100 g^{-1}). La capacidad de un suelo o alguna otra sustancia con carga negativa, de retener cationes en forma intercambiable se conoce como capacidad de intercambio catiónico (CIC), la cual es una medida de la carga negativa del suelo y se expresa como $\text{C}(+)\text{mol kg}^{-1}$ de suelo. La capacidad de intercambio

catiónico depende del tipo y proporción de los minerales de arcilla y la materia orgánica presente en el suelo, los suelos arcillosos presentan una mejor capacidad de intercambio que los suelos arenosos, similarmente los suelos ricos en materia orgánica, presentan una capacidad de intercambio mayor que aquellos con niveles inferiores. Diferentes cationes permanecen en sitios de intercambio con diferente afinidad de adsorción o fuerza de adhesión lo cual determina la facilidad o dificultad con la que estos pueden desligarse del sitio de intercambio por cationes en la solución. En general la fuerza con la que diferentes cationes son mantenidos en el complejo de intercambio se da en el siguiente orden: $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+, \text{H}^+, \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$. En donde el aluminio es el más fuerte de los cationes y el sodio el de mayor pérdida (Essington, 2004; Roy *et al.*, 2006).

2.4.2.3. *Materia orgánica (M.O.)*

El carbono orgánico es uno de los principales componentes de los seres vivos: aproximadamente 50% del peso seco de la materia orgánica (M. O.) es carbono. En el ambiente su ciclo está estrechamente ligado al flujo de energía, debido a que las principales reservas de energía de los organismos son compuestos de carbono reducidos que han derivado de la fijación del CO_2 atmosférico, ya sea por medio de la fotosíntesis, o con menor frecuencia de la quimiosíntesis (Tiessen y Moir, 1993). Las plantas y los animales que mueren son desintegrados por los microorganismos, en particular bacterias y hongos, los cuales regresan el carbono al medio en forma de bióxido de carbono (Baker y Herson, 1994).

La materia orgánica del suelo es la fracción orgánica que incluye residuos vegetales y animales en diferentes estados de descomposición; tejidos y células de organismos que viven en el suelo; y sustancias producidas y vertidas por esos organismos. Esta definición es muy amplia pues incluye tanto a los materiales poco alterados como a aquellos que sí han experimentado cambios de descomposición, transformación y resíntesis dentro del suelo. Este material se encuentra en un estado de descomposición activo, estando sujeto al ataque continuo de los microorganismos del suelo. Por lo tanto, la permanencia de este material es transitoria y está siendo renovado continuamente por la adición de residuos vegetales. Además se pueden incluir compuestos orgánicos tóxicos, provenientes de las actividades industriales del hombre, como la contaminación de suelos por hidrocarburos del petróleo, que también constituye parte de la materia orgánica del suelo (Etchevers, 1988).

El contenido de materia orgánica en la superficie de los suelos minerales es comúnmente alrededor de 0.5 a 5% en peso, sin embargo en suelos turbosos se reportan cifras de hasta 100%. A pesar de su bajo contenido en los suelos minerales, el material orgánico tiene un efecto profundo sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos. Las fracciones no húmicas y húmicas de la fracción orgánica son importantes en el suelo. Los materiales no húmicos constituyen, a corto plazo, fuente de alimentos y energía para los microorganismos. Las sustancias húmicas generan a largo plazo efectos tales como el mantenimiento de una buena estructura del suelo, aumenta la capacidad de intercambio catiónico, regulan el pH y la capacidad de retención del agua (Ortega, 1981).

2.4.2.4. Nitrógeno

El nitrógeno es un elemento indispensable para la vida, forma parte de las principales biomoléculas de todos los seres vivos. El nitrógeno es el nutrimento más abundante en las plantas ya que constituye del 2-4% de su materia seca, las cuales lo absorben en forma de ion nitrato (NO_3^-) o en forma de ion amonio (NH_4^+). Sin embargo, la cantidad de nitrógeno presente en muchos suelos es escasa, debido a su propia dinámica y a su ciclo biogeoquímico. El nitrógeno puede llegar al suelo gracias a los aportes de materia orgánica y a la fijación bacteriana a partir del aire. Dentro del suelo es aprovechado por las plantas, animales y microorganismos que lo incorporan a sus tejidos. Cuando dichos organismos se mueren, el nitrógeno reingresa al suelo completando el ciclo. Este ciclo es complejo e involucra una serie de reacciones y organismos con diferentes metabolismos. Siempre comienza con compuestos orgánicos sencillos (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , N_2 , NH_3) y termina con compuestos orgánicos complejos; que a través de la descomposición regresan a la etapa de compuestos sencillos (Roy *et al.*, 2006).

Además de su importancia para las plantas, el nitrógeno es uno de los elementos más ampliamente distribuido en la naturaleza y después del carbono, hidrógeno y oxígeno ningún elemento está tan relacionado con las reacciones llevadas a cabo por los seres vivos. Igualmente, sus transformaciones influyen el comportamiento del ciclo del fósforo y el azufre. A pesar de su abundancia, el suelo solo cuenta con una mínima fracción del total que se encuentra en la

litósfera, y de este, solo una pequeña parte está disponible para las plantas, además de ser móvil en las plantas, también es parte de la naturaleza, circulando entre la atmósfera y los organismos vivos, en donde intervienen procesos fisicoquímicos y biológicos (Mengel y Kirkby, 2001).

Los microorganismos participan de forma importante en el ciclo del nitrógeno en el suelo, debido a que realizan la fijación del nitrógeno, nitrificación y desnitrificación, así como su inmovilización. Se reportan como fracciones predominantes al amonio y nitratos (Foster, 1995; Maynard y Kalra, 1993).

Comúnmente se evalúa al amonio intercambiable por representar la fuente de nitrógeno más directamente disponible para su incorporación en aminoácidos, sin requerir ser oxidado o reducido (Gaudy y Gaudy, 1981). Adicionalmente, se recomienda cuantificar nitratos para complementar la fracción de nitrógeno inorgánico susceptible de ser empleado por los microorganismos. Para la mayoría de los materiales una relación C/N cercana a 10:1 mantendrá estos elementos en equilibrio aproximado. En los suelos normalmente el contenido de nitrógeno varía de 0.05 a 2% en sus diferentes formas.

2.4.2.5. Fósforo

El fósforo es un macronutriente esencial para las plantas y los microorganismos, junto con el nitrógeno y el potasio. Puede ser un nutriente limitante, ya que es un componente de los ácidos nucleicos y de los fosfolípidos (Muñoz *et al.*, 2000).

El fósforo es un elemento químico vital de importancia en la nutrición vegetal, desempeñando un papel fundamental en un gran número de reacciones enzimáticas. Este elemento se hace más fácilmente disponible en suelos ácidos, en la materia orgánica tienen una función esencial, al descomponerse la materia orgánica libera citratos, oxalatos, tartratos y lactatos los cuales se combinan más fácilmente con el Fe, y Al que con el P. El resultado es la formación de menos Fe soluble y Fosfato de Al y la disponibilidad de más fósforo (Ortiz, 1990).

El fósforo elemental (P) no se encuentra en estado libre en la naturaleza porque se oxida muy fácilmente; sin embargo, son muy comunes los compuestos orgánicos y principalmente minerales que contienen fósforo. En términos generales, el fósforo del suelo se clasifica en fósforo orgánico e inorgánico, dependiendo de la naturaleza de los compuestos que forme. La forma orgánica se encuentra en el humus y la materia orgánica, y sus niveles en el suelo pueden variar desde 0 hasta mayores que 0.2%. La fracción inorgánica está constituida por compuestos de hierro, aluminio, calcio y flúor, entre otros, y normalmente son más abundantes que los compuestos orgánicos. Solo una pequeña parte del P aparece en solución en suelo ($< 0.01\text{--}1\text{ mg L}^{-1}$).

Desde el punto de vista de la nutrición de las plantas, el fósforo puede clasificarse en fracciones de acuerdo a su accesibilidad para las mismas: el fosfato en la solución del suelo, el cual es completamente accesible, a pesar de ser solo una pequeña fracción del fósforo total; y el fósforo virtualmente inaccesible (más del 90%) está presente de forma insoluble y fijada, fósforo por óxidos hidratados y minerales de silicato; porción que puede ser descrita como no lábil, situación que favorece su reducida movilidad en el suelo. No obstante debido al crecimiento de

las raíces de las plantas, que se extienden a través del suelo y entran en contacto con el fosfato en solución que posteriormente es absorbido, se produce un agotamiento de la concentración de fósforo en la vecindad de las raíces lo cual genera un gradiente entre la concentración del elemento en el área cercana a la raíz y el resto del suelo, regulando así las tasas de difusión de fosfato hacia las raíces de la planta (Mengel y Kirkby, 2001).

El fósforo se localiza, entre muchos otros compuestos, en los fosfolípidos, que son derivados del ácido fosfoglicérico, que se encuentran ampliamente distribuidos en las plantas. Este grupo de compuestos presentan en su molécula, una parte hidrófila y una lipófila, característica que los capacita para actuar como eslabones en las estructuras lipófilas de la célula, participando activamente en la formación de membranas (Alcántar y Trejo, 2007).

2.4.2.6 Bases intercambiables

Potasio. Los incrementos de potasio están estrechamente relacionados con la cantidad de materia orgánica, sin embargo, la disponibilidad de éste depende de la textura de los suelos (Aguado *et al.*, 2002). El tipo de arcilla elítico o vermiculítico, promueve mayores cantidades de potasio, que puede ser liberado en la medida que se transforman las estructuras (Maldonado *et al.*, 2006).

El potasio es el séptimo elemento más abundante de la tierra, encontrándose ampliamente distribuido en la corteza terrestre, a razón de 4-60 t ha⁻¹ en la capa arable de los suelos agrícolas, no obstante su mayor parte está en forma de minerales insolubles. Del 90-98% de este elemento se localiza en la estructura

de varios minerales primarios y secundarios, los cuales mediante procesos de intemperización liberan potasio hidrosoluble e intercambiable que puede ser aprovechado por las plantas, no obstante su disponibilidad es tan baja que se conoce como potasio no aprovechable. Por otro lado, existe una fracción lentamente aprovechable, que representa del 1-10% del total contenido en el suelo que se encuentra en los espacios intermicelares de las arcillas tipo 2:1, como illita, vermiculita y motmorillonita; mientras que del 1-2% se encuentra en una forma fácilmente aprovechable, constituida por el potasio hidrosoluble y el intercambiable, representando una mínima fracción del total, no obstante debido al equilibrio dinámico existente entre las formas de potasio hidrosoluble, intercambiable y fijado, pueden abastecer los requerimientos vegetales (Alcántar y Trejo, 2007).

En las plantas, el potasio se absorbe en su forma iónica K^+ , es esencial y requerido en grandes cantidades para el crecimiento y reproducción, su importancia radica en la influencia que tiene sobre la calidad de los frutos y productos de los cultivos. Regula la apertura y cierre de estomas, además de ser activador de complejos enzimáticos (Mengel y Kirkby, 2001).

Calcio (Ca). El Ca presente en el suelo, aparte del añadido como fertilizante o enmienda, procede de las rocas y de los minerales del suelo, y su contenido total puede variar ampliamente. En los suelos considerados no calizos oscila entre el 0.10 y 0.20%, mientras que en los calizos puede alcanzar hasta un 25%. De forma general, se puede decir que el calcio proviene de la meteorización de los minerales. Estos materiales son tan comunes que la mayoría de los suelos

contienen suficiente calcio para cubrir gran parte de las necesidades de la planta (IMP, 2006).

Magnesio (Mg). El Mg es un elemento químicamente muy activo pero que no aparece por sí solo como elemento libre en la naturaleza sino que se encuentra distribuido en forma mineral. Según diversas estimaciones su contenido medio en la corteza terrestre puede situarse en torno a un 2.30% mientras que en el suelo se aproxima a un 0.50% (IMP, 2006).

2.4.2.7 Microelementos

Cobre (Cu). El cobre es uno de los elementos esenciales más importantes tanto para las plantas como para los animales; sin embargo, cantidades excesivas de éste pueden producir efectos tóxicos. Entre los diferentes tipos de rocas ígneas, el cobre prevalece en los basaltos. En las rocas sedimentarias es más abundante en los esquistos. En general, su abundancia en las rocas basálticas es más alta que en las graníticas, y muy baja en las rocas carbonatadas (IMP, 2006).

Hierro (Fe). A pesar de su abundancia en suelos y rocas, es uno de los micronutrientes más deficiente. El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza continental después del O, Si y Al, constituyendo alrededor del 15% en peso de la corteza terrestre. Es, con diferencia, el microelemento más abundante en los suelos, ya sea como constituyente mineral o bien bajo la forma de óxidos e hidróxidos. No obstante, en suelos con horizontes enriquecidos en

materia orgánica, el hierro aparece principalmente en forma de quelatos. Su contenido en los suelos templados suele variar entre el 1 y 5%. En casos aislados, pueden hallarse valores cercanos al 10%. En el suelo, el contenido de hierro fluctúa en el rango de 0.20 al 5%, en un orden de magnitud similar al de la roca subyacente (Hacher *et al.*, 2001).

Zinc (Zn). El zinc es un elemento ampliamente distribuido que se halla en cantidades pequeñas, pero suficientes, en la mayoría de los suelos y plantas. La cantidad de zinc que se puede encontrar en un suelo depende directamente de la naturaleza de la roca madre. Hay, no obstante, un aspecto importante que es necesario resaltar en relación con el zinc útil en los suelos y es que la parte superficial de muchos de ellos, que corresponde con los horizontes superiores, contienen siempre más zinc que los horizontes inferiores. Se cree que este hecho se debe por una parte a que los residuos de las plantas, al quedar depositados en la superficie del suelo, proporcionan tras su descomposición, cierta cantidad del elemento; por otra, el zinc no presenta una emigración descendente en el perfil, como ocurre con otros elementos, ya que tiende a quedar adsorbido por las arcillas y la materia orgánica (IMP, 2006).

Manganeso (Mn). El manganeso presente en los suelos es originado principalmente por la descomposición de las rocas ferromagnéticas. Es un microelemento similar al hierro, tanto en su química como en su geología y muy abundante en la litosfera. En las rocas, el contenido de manganeso varía entre 350 y 2000 mg kg⁻¹. El contenido en el suelo muestra variaciones considerables,

pero normalmente fluctúa entre 20 y 800 mg kg⁻¹. No obstante, y al igual que en el caso del hierro, estos contenidos totales no pueden considerarse como una indicación de su disponibilidad para las plantas ya que existen muchos factores que afectan a su absorción (IMP, 2006).

Boro (B). El boro es esencial en el crecimiento de los granos de polen y en el crecimiento del tubo polínico. El boro es esencial en la formación de las paredes celulares. El boro forma complejos de azúcar/boro asociados con la translocación del azúcar, y es importante en la formación de proteínas. La deficiencia de boro por lo general atrofia la planta comenzando con el punto de crecimiento y las hojas nuevas. Esto indica que el boro no es translocado en la planta. Alta pluviosidad y lixiviado reducen la disponibilidad de boro. El clima seco también puede desencadenar su deficiencia. Las deficiencias temporales de boro son muy comunes cuando el clima está seco. Los síntomas tienden a desaparecer una vez que el suelo es humedecido de nuevo. Los cultivos varían enormemente en cuanto a sus necesidades de boro, y tolerancia al mismo. Pero, la línea de división entre cantidades deficientes y tóxicas es más angosta que para ninguno de los micronutrientes esenciales. Debido a esto, el boro debe ser usado en forma muy cuidadosa, especialmente en las rotaciones que involucren cultivos con sensibilidades distintas al boro (IMP, 2006).

2.5. Producción de café en México

Las regiones cafetaleras son relevantes tanto por su importancia social económica, cultural y ambiental. De los 12 estados cafetaleros del país, figuran como principales Chiapas, Veracruz, Oaxaca y Puebla. El café representa la actividad productiva más importante dentro del sector agropecuario nacional y es el principal producto agrícola de exportación, se cultiva en 664,793.58 ha distribuidas en 81,084 productores (UACH, 2005). México es el cuarto país productor de café después de Brasil, Colombia y Vietnam, y el primer exportador de café orgánico a nivel mundial. En los años ochenta el café generó el 36% del valor de las exportaciones agrícolas y ocupó el quinto lugar por superficie cosechada antecedido por el maíz, el frijol, el sorgo y el trigo. En los años 70, contribuyó con US \$ 100 millones a la economía, esta cifra fue cuadruplicada para 1976 y en 1994 generó divisas por US \$ 700 millones. Esta situación hizo del café uno de los principales cultivos de exportación del país, como actividad agrícola ocupa cerca de 3 millones de personas en los procesos de producción y comercialización (Nestel, 1995).

Asimismo es representativo que gran parte de las áreas de café se encuentran en regiones de alta biodiversidad de flora y fauna, designadas por la Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), como áreas prioritarias de conservación por el alto número de especies endémicas presentes y remanentes de extensas áreas de ecosistemas de selvas altas y medianas, selvas bajas caducifolias, bosques de encinos y bosques mesófilos de montaña (Moguel y Toledo, 1996; Moguel y Toledo, 1999).

La producción de café en México a diferencia de los sistemas altamente tecnificados en países como Brasil y Colombia, se realiza en sistemas tradicionales, caracterizados por la presencia de un dosel de árboles diverso. Estructural y florísticamente ofertan gran número de productos (madera, leña, frutos, plantas comestibles y medicinales) y servicios (conservación de suelos, regulación hidrológica, captura de carbono, conservación de biodiversidad) (Pohlan, 2002; Perfecto *et al.*, 1996; Perfecto *et al.*, 2005).

El sistema policultivo comercial parte de la eliminación total de la cobertura forestal y la introducción de especies con buenos atributos de sombra para el café y generación de productos; para tal fin se emplean especies como Inga spp, caucho (*Castilla elastica*), cedro (*Cedrela mexicana*), cítricos, plátano, pimienta, guayaba entre otros.

El café se cultiva principalmente por productores campesinos. De la superficie total cultivada de café, el 92% corresponde a pequeños productores con menos de 5 ha, el 60% de los productores pertenecen a ejidos o comunidades, siendo más de la mitad de ellos, indígenas, representantes de 32 grupos étnicos (Moguel y Toledo, 1996). El café se desarrolla en la franja montañosa comprendida entre 600 y 1400 m de altitud, aunque puede encontrarse en zonas más bajas, donde la producción se considera marginal. Según, Moguel y Toledo (1999), este cultivo crece bajo árboles de sombra, dando como resultado varios tipos de sistemas; 1) rústicos en donde el café ha sido sembrado debajo del bosque natural; 2) sistemas de policultivo tradicional que tienen una diversidad de árboles y arbustos, 3) los sistemas de policultivo comercial, conformados principalmente por frutales cuyo destino de la producción es el mercado regional; 4) sistemas

con sombra monoespecífica, principalmente conformados por árboles del género Inga (chalum, jinicuil, cuajinicuil, tzelel) y 5) el sistema a pleno sol (sin sombra).

2.5.1. Los sistemas de producción de café en Veracruz, México

Un sistema de producción o agroecosistema es la diversidad de plantas que se cultivan dentro de una parcela, analizada desde el punto de vista de su distribución en el espacio, en el tiempo y su nivel tecnológico. El sistema agrícola de producción de café se define como “una forma típica de producir café con rasgos característicos, únicos e inmediatamente reconocibles”. Para definirlos se utiliza al tipo y uso de árboles de sombra dentro de cada sistema, el cual se define por la estructura de la misma (Escamilla, 1994).

El cultivo de café en México tiene alrededor de 60 regiones productoras, con diferencias ambientales, técnicas, económicas, sociales y culturales. Estas regiones se agrupan a su vez en grandes zonas productoras. En la zona centro de Veracruz se encuentran cuatro regiones productoras.

Los sistemas de café encontrados se clasifican en: sistema especializado, sistema policultivo tradicional, sistema policultivo comercial, sistema rusticano y sistema a pleno sol.

A continuación se explican las características de los sistemas tradicional, comercial y a pleno sol, los cuales se evaluaron en la presente investigación.

2.5.1.1. Sistema policultivo tradicional (SPT)

Los SPT son aquellos cafetales bajo sombra en cuya composición existe una gran diversidad de especies vegetales, como la vegetación natural (primaria y secundaria) y especies cultivadas (nativas e introducidas). Este sistema de cultivo es el de mayor distribución en las regiones cafetaleras de México, practicado por pequeños productores, y con alta participación indígena. El sistema policultivo tradicional es muy parecido al sistema natural, ambos son plantaciones de café en sistemas agroforestales con sombra altamente diversificada, similares en su estructura horizontal y vertical (Escamilla *et al.*, 1994).

2.5.1.2. Sistema policultivo comercial (SPC)

El sistema de policultivo comercial (SPC) se distingue por la producción de café con especies asociadas que están orientadas a la comercialización, como una estrategia de diversificación productiva. Son plantaciones de café en cuya estructura se reduce la diversidad vegetal a un número de dos a cuatro especies por cafetal, ordenadas espacialmente con el propósito de un aprovechamiento intensivo del espacio para la obtención de varios productos destinados principalmente al mercado.

Las especies que pueden participar en el cultivo de este sistema son las siguientes: aguacate has, guanábana, limón persa, macadamia, naranja valencia, naranja de azúcar, níspero, papaya, plátano dominico, tepejilote, chile, jitomate, frijol, maíz, cedro rojo, chalahuite, cardamomo (Escamilla *et al.*, 1994).

2.5.1.3. Cultivo a pleno sol (SPS)

Este sistema se cultiva a sol o cielo abierto, modalidad que se práctica en México. Son cafetales que se cultivan sin sombra. Esta modalidad se implementó en ciertas regiones productoras de café, como son Xicotepec, Puebla, Centro de Veracruz y Soconusco en Chiapas (Escamilla, 2011).

2.6. Bosque húmedo de montaña o bosque mesófilo de montaña

El término “bosque mesófilo de montaña” fue acuñado por Miranda (1947), para referirse a una comunidad vegetal presente en la cuenca del Río Balsas, distribuida en una franja altitudinal similar a la del encinar, pero donde predominan elementos tropicales de montaña entremezclados con otros típicamente boreales y donde las condiciones de humedad son muy favorables, lo que resulta en una gran riqueza de especies, con abundancia de plantas trepadoras y epífitas. Rzedowski (1978), formalizó este nombre para referirse a las comunidades semejantes en todo el territorio nacional y sintetizó el conocimiento que se tenía de ellas hasta esa fecha. Desde entonces una gran cantidad de estudios, tanto de índole florística como ecológica y biogeográfica, han sido publicados para diferentes sitios bajo este nombre.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en sistema tradicional (café con árboles de uso múltiple), sistema comercial (policultivo café-macadamia-aguacate), cultivo de café pleno sol (monocultivo) y el sistema bosque de niebla o mesófilo de montaña, ubicados en el Centro Regional Universitario Oriente (CRUO) en el Municipio de Huatusco, Veracruz. El CRUO, que se ubica a $19^{\circ} 10' 25''$ de latitud norte y $96^{\circ} 57' 43''$ de longitud oeste (Figura 1), a una altura de 1,345 msnm, se encuentra ubicado en la zona centro del estado de Veracruz. Limita al norte con los municipios de Tlatetela y Sochiapa; al noreste con Comapa; al sureste con Zentla y Tepatlaxco; al sur con Ixhuatlán del Café y Coscomatepec; al oeste con Calcahualco y al noroeste con el estado de Puebla.

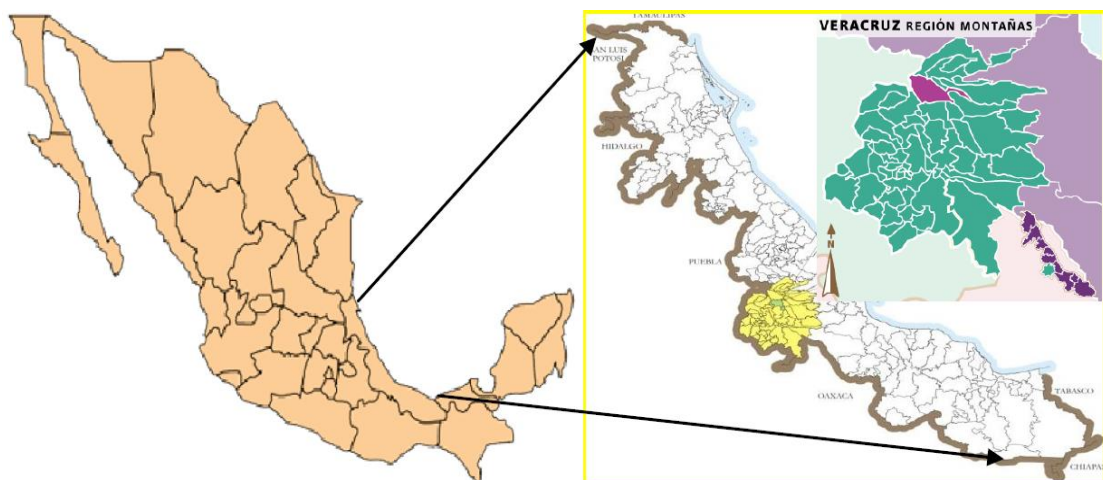


Figura 1. Localización del área de estudio.

El **suelo** es de tipo cambisol y luvisol. El primero se caracteriza por presentar en el subsuelo aspecto de roca y susceptibilidad a la erosión, el segundo presenta acumulación de arcilla en el subsuelo y alta susceptibilidad a la erosión. El **clima** es cálido-húmedo con una temperatura promedio de 19.1 °C; su precipitación media anual es de 1,825 mm. (Cano *et al.*, 1998).

3.2 Descripción de los sistemas de producción

Existen diferentes tipos de sistemas de producción en la región. El presente trabajo de investigación se realizó en sistemas de café tradicional bajo sombra (con diversas especies forestales nativas), otro con árboles frutales como macadamia y aguacate y uno más sin sombra (a pleno sol). Además del sistema bosque natural o bosque mesófilo de montaña

Sistema de Producción de Café Tradicional (SPCT):

Este sistema es una plantación tradicional de café bajo sombra en cuya composición existe una gran diversidad de árboles nativos o de vegetación natural así como de *Persea schiedeana* (chinene), *Inga* spp. (*Inga*), y *Grevillea robusta* (*grevillea*). Los cafetos presentaron un arreglo topológico de 2 x 2 m. Posee una cubierta vegetal con un valor medio de captura de carbono de 53.56 Mg ha⁻¹ (Hernández, 2013).

Sistema de Producción Café-Macadamia-Aguacate (SPCMA):

El sistema de policultivo comercial se distingue por la producción de café con especies asociadas que están orientadas a la comercialización, como una estrategia de diversificación productiva. En este caso el sistema está compuesto

por el policultivo de elementos: café, macadamia y aguacate. Posee una cubierta vegetal con un valor medio de captura de carbono de 17.10 Mg ha^{-1} (Hernández, 2013).

Sistema de Café a Pleno Sol (SCPS):

Este cultivo como bien lo expresa el nombre es el café sin sombra, se busca maximizar la producción de café como monocultivo, es poco común en el país casi representa el 10%. Posee una cubierta vegetal con un valor medio de captura de carbono de 9.18 Mg ha^{-1} (Hernández, 2013).

Sistema bosque de niebla natural o mesófilo de montaña (Bosque):

La vegetación dominante en el Centro Regional está representada por bosque mesófilo, sumamente perturbado por la introducción de la ganadería extensiva y el cultivo de café. Esta comunidad vegetal presenta tres estratos; el superior que alcanza los 28 y 30 m de altura, el intermedio ubicado entre los 18 y 20 m y el inferior situado entre 4 y 6 m conformado por una sola especie (Pérez, 2004). Con base al listado florístico elaborado por el autor antes citado en un relicto de vegetación del CRUO, de un poco más de una hectárea, determinan 44 familias, con 4 géneros y 84 especies. Los géneros predominantes encontrados son Liquidambar, Quercus, Meliosoma, Cornus, Ilex y Clethra. Su superficie es de 1.1 ha, desde 1980 se ha establecido este pequeño relicto. El lugar ha permanecido sin disturbio por varios años como un jardín botánico natural, el cual ha sido utilizado para describir las características de este tipo de vegetación. El área se ubica sobre tres condiciones de microrrelieve: vega de río, ladera y meseta. En 1987 se hizo la descripción de la vegetación del relicto correlacionando aspectos

de clima y suelo (Pérez, 2004). Posee una cubierta vegetal con un valor medio de captura de carbono de $421.01 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Hernández, 2013).

3.3 Selección de parcelas

Para el proyecto se seleccionaron cuatro sistemas, los cuales fueron considerados como niveles de un primer factor de tratamientos. Dentro de cada uno de los sistemas seleccionados se muestrearon aleatoriamente 3 sitios. Dentro de cada sitio se evaluaron las propiedades del suelo en tres profundidades diferentes: 0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm (Figura 2).

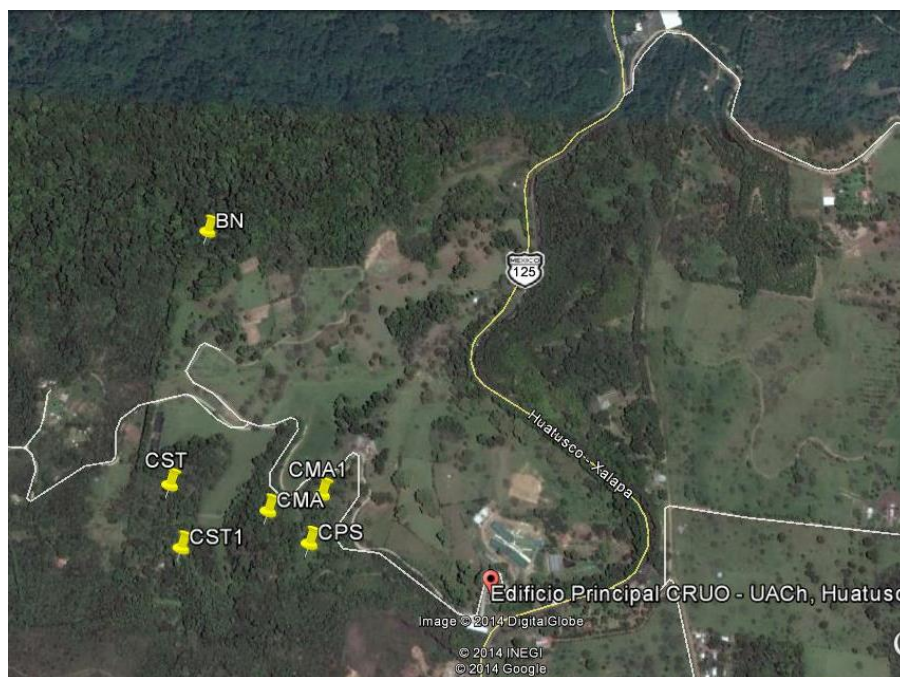


Figura 2. Localización de los sistemas de producción y el bosque.

Los sistemas fueron: bosque de niebla o mesófilo de montaña (Bosque), sistema de producción café, macadamia, aguacate (SPCMA), sistema de producción café tradicional (SPCT), y sistema de café a pleno sol (SCPS). Se realizó un recorrido

de campo para identificar el área de estudio de cada sistema en donde se recopilaran sus características.

3.4 Variables evaluadas

Para determinar la eficiencia nutrimental en los suelos de cuatro sistemas, se evaluarán las siguientes variables dependientes: Densidad Aparente (DAP), Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitamiento Permanente (PMP), Materia Orgánica (MO), Nitrógeno inorgánico (amonio, nitratos), Nitrógeno total, Fósforo, Bases Intercambiables, Microelementos, Potencial de Hidrogeno y Capacidad de Intercambio Catiónico.

3.5 Propiedades físicas del suelo

Las determinaciones de los parámetros físicos del suelo fueron realizadas, en el mes de octubre a diciembre de 2014, en el laboratorio de física de suelos de la Universidad Autónoma Chapingo (Cuadro 1), bajo los estándares y metodologías de la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Cuadro 1. Metodologías utilizadas para las determinaciones de las propiedades físicas del suelo.

Determinación	Metodología Utilizada
Densidad aparente	Probeta
Capacidad de campo (CC)	Plato y membrana de presión
Punto de marchitez permanente (PMP)	Plato y membrana de presión
Textura	Hidrómetro

3.6. Propiedades químicas del suelo

Las determinaciones de los parámetros químicos del suelo fueron realizadas, con la finalidad de establecer las condiciones nutrimentales para las plantas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Metodologías utilizadas para las determinaciones de las propiedades químicas del suelo.

Determinación	Metodología Utilizada
pH	Potenciométrico en relación muestra agua 1:2
Materia orgánica	Walkley y Black
Nitrógeno inorgánico	Extraído con cloruro de potasio 2 n y determinado por arrastre de vapor
Nitrógeno total (N tot:)	Determinado por arrastre de vapor: Kjeldahl. Bray p-1
Fosforo	Extraído con acetato de amonio 1.0 n pH 7.0 y determinado por espectrofotometría de emisión de flama
Potasio	
Calcio, Magnesio (Ca, Mg)	Extraído con acetato de amonio 1.0 n pH 7.0 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Hierro, Cobre, Zinc, Manganeso	Extraído con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Boro	Extraído con CaCl_2 1.0 m y determinado por fotolorimetría con azometina-h
Capacidad de intercambio catiónico	Acetato de amonio 1.0 n pH 7.0 determinado por arrastre de vapor

Las determinaciones fueron realizadas en el mes de noviembre de 2014 en el laboratorio central de la Universidad Autónoma Chapingo, bajo las metodologías establecidas por la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

3.6 Modelo estadístico

Los datos fueron analizados conforme a un experimento factorial de dos factores 4X3, correspondiente a 4 sistemas y tres profundidades de suelo. Se

consideraron 3 repeticiones por cada una de las 12 combinaciones de tratamientos. El modelo estadístico correspondiente es:

$$Y_{ijt} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijt}$$

Donde:

ε_{ijt} s $\sim N(0, \sigma^2)$, ε_{ijt} s son mutuamente independientes

$t = 1, \dots, r_{ij}$; $i = 1, \dots, a$; $j = 1, \dots, b$

Y_{ijt} representa el valor de la respuesta en la replicación t-ésima del tratamiento con el i-ésimo sistema de producción y la j-ésima profundidad del suelo.

μ es una constante (media general)

α_i representa el efecto del sistema i-ésimo

β_j representa el efecto de la profundidad j-ésima

$(\alpha\beta)_{ij}$ representa el efecto de la interacción para el i-ésimo sistema y la j-ésima profundidad

ε_{ijt} son los errores aleatorios

3.7 Análisis de datos

Los datos obtenidos de todas las características evaluadas fueron analizados mediante el software estadístico SAS 9.1 (Statistical Analysis System). Se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparaciones múltiples de medias por el método de Tukey (Steel and Torrie, 1998) para determinar diferencias significativas entre los 4 sistemas de producción y entre las 3 diferentes profundidades de suelo, además de las posibles interacciones entre estos dos factores.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Propiedades físicas

Las clases texturales de los suelos para los cuatro sistemas fueron: por profundidad 0-10 cm, franco-arcilloso-arenoso (8.3%), franco-arenoso (25%) y franco (66.7%), 10-20 cm, franco-arcilloso-arenoso (16.7%), franco-arenoso (8.3%), franco (66.7%) y franco-arcilloso (8.3%), 20-30 cm, franco-arcilloso-arenoso (33.3%), franco-arenoso (8.3%), franco (50%) y franco-arcilloso (8.3%). De acuerdo al análisis textural se puede observar que todos los suelos y a todas las profundidades presentaron una textura franca con variaciones (Cuadro 3).

Cuadro 3. Textura del suelo perteneciente a los distintos sistemas estudiados (Bosque, SPCMA, SPCT y SCPS) a diferentes profundidades (0-10, 10-20, 20-30 cm).

Sistema	Nombre	UM	% de A			% de R			% de L		
			0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30	0-10	10-20	20-30
1	BOSQUE	1	60.2	64.2	66.2	28.52	28.52	28.52	11.28	7.28	5.28
		2	48.2	62.2	64.2	14.52	8.52	8.52	37.28	29.28	27.28
		3	58.2	52.2	48.2	16.52	22.52	18.52	25.28	25.28	33.28
2	SPCMA	1	41.48	37.48	37.48	24.52	32.52	28.52	34	30	34
		2	45.48	47.48	43.48	20.52	22.52	24.52	34	30	32
		3	43.48	45.48	43.48	22.52	22.52	24.52	34	32	32
3	SPCT	1	47.48	43.64	51.64	20.52	20.36	20.36	32	36	28
		2	58.92	43.64	51.64	9.08	20.36	20.36	32	36	28
		3	58.92	43.64	51.64	13.08	20.36	20.36	28	36	28
4	SCPS	1	39.48	43.48	43.48	22.52	24.52	28.52	38	32	28
		2	44.92	46.92	50.92	23.08	23.08	21.08	32	30	28
		3	41.48	41.48	47.48	24.52	24.52	22.52	34	34	30

4.1.1 Densidad Aparente

El análisis de varianza mostró que para la densidad aparente (DAP), se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P < 0.0001$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 3 se aprecia que el sistema con una menor densidad aparente fue el Bosque, siguiéndole el SPCT y el SCPS. El sistema con los valores más altos de densidad aparente fue el SPCMA. Lo anterior se debió a que los sistemas, Bosque y SPCT presentaron las concentraciones más altas de materia orgánica. Como se sabe los sistemas con mayor contenido de carbono y materia orgánica, presentan valores menores de densidad aparente (Monroy, 2009). El SCPS presentó una menor cubierta vegetal, en comparación con los sistemas SPCMA, SPCT y Bosque, esto provocó un aporte menor de materia orgánica, y una mayor oxidación de la misma, la materia orgánica tiene una estrecha relación con la densidad aparente y el espacio poroso. La materia orgánica posee menor densidad y mayor porosidad que los suelos minerales (Zhang, 1994). Al existir mayores contenidos de materia orgánica los suelos presentan menores densidades por consiguiente, condiciones físicas favorables, en comparación con densidades altas (Cavazos y Rodríguez, 1992; Carter, 2002).

Se aprecia que en el caso del efecto de la profundidad sobre la densidad aparente, a medida que está se incrementó la densidad aparente aumentó para el Bosque, SPCMA y SPCT. En el caso del SCPS el comportamiento de la densidad aparente fue inverso, es decir, a medida que se incrementó la profundidad disminuyó la densidad aparente. Coras (1989), menciona que la

densidad aparente aumenta con la profundidad en el perfil del suelo, esto se debe al bajo contenido de materia orgánica a mayor profundidad, observándose menor agregación y mayor compactación.

Geissert e Ibáñez (2008), encontraron en suelos de la zona cafetalera de Veracruz, que los suelos son generalmente livianos y esponjosos, caracterizándose por una densidad aparente situada entre 0.88 y 1.04 Mg m^{-3} en suelos cafetaleros, y entre 0.49 y 0.56 Mg m^{-3} en forestales. Los valores promedios siempre fueron más bajos en los horizontes superficiales ($0.89 \pm 0.11 \text{ Mg m}^{-3}$) que en los subsuperficiales ($0.99 \pm 0.13 \text{ Mg m}^{-3}$), rebasando en ocasiones estos últimos la unidad, esto fue muy similar con lo que ocurrió en los distintos sistemas estudiados.

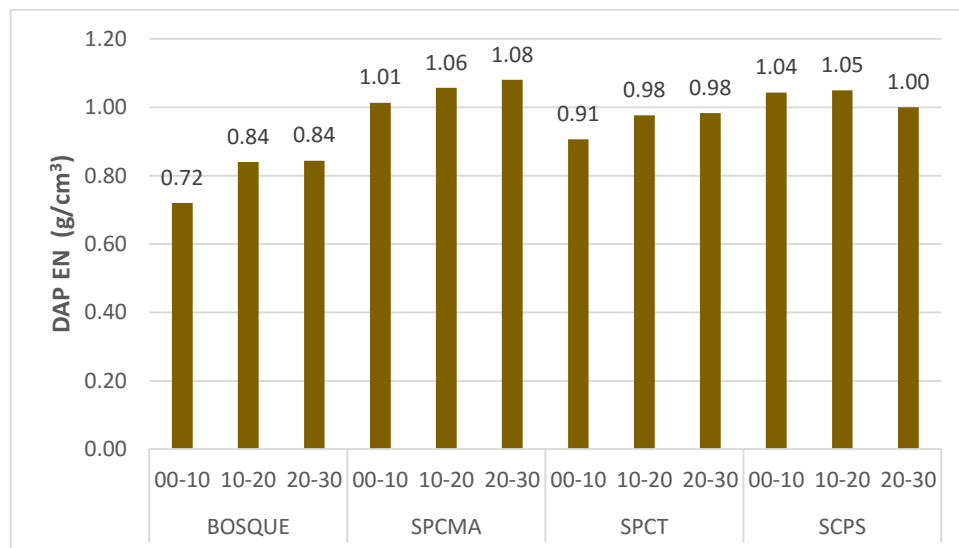


Figura 3. Comportamiento de la densidad aparente (DAP, g cm^{-3}) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de densidad aparente se encontró que el Bosque y el SPCT, se clasificaron dentro de suelos orgánicos

y volcánicos, mientras que el SPCMA y el SCPS dentro de los suelos minerales (Cuadro 4).

Cuadro 4. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de la densidad aparente, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.

Tipos de suelos	g cm^{-3}
Orgánicos y volcánicos	< 1.00
Minerales	1.0 - 1.19
Arcillosos	1.2 - 1.32
Francosos	> 1.32
Arenosos	

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto a la densidad aparente, se encontró que no hubo diferencia significativa entre el SPCMA y el SCPS, así como para el SCPS y SPCT tampoco hubo diferencia significativa. En el caso del Bosque fue significativamente diferente a los otros sistemas. Los valores medios sobre los sistemas encontrados fueron de 1.05, 1.03, 0.95 y 0.80 g cm^{-3} para SPCMA, SCPS, SPCT y Bosque respectivamente. En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, no existieron diferencias significativas en la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$).

Los sistemas estudiados no reflejaron cambios en la densidad aparente y las pequeñas diferencias no pueden ser atribuidas a éstos; pudieran estar determinadas por la textura, los contenidos de materia orgánica y es afectada por el estado de compactación del suelo (Lal, 1976). Se encontró que en Bosque y SPCT, hubo mejores condiciones estructurales del suelo debido a la relación entre las variables de materia orgánica y densidad aparente. Alvarado (2007), tampoco reportó diferencias significativas atribuidas al manejo en sistemas de café con diferente manejo y bosque, encontrando valores de densidad aparente que oscilan entre 0.89 y 1.29 g cm^{-3} .

4.1.2 Humedad en el suelo

El análisis de varianza mostró que para la capacidad de campo (CC) y para el punto de marchitamiento permanente (PMP), se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), para la CC con $P = 0.0003$, y para el PMP con $P < 0.0001$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 4 se aprecia que el sistema con una mayor capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente fue el Bosque, siguiéndole el SPCT y SPCMA. El sistema con los valores más bajos de capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente fue el SCPS. Se aprecia que en el caso del efecto de la profundidad sobre los valores de la capacidad de campo y del punto de marchitamiento permanente a medida que esta se incrementó la capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente disminuyeron para el Bosque, SPCMA y SPCT. En el caso del SCPS el comportamiento de la capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente fue variable.

Para la humedad aprovechable, el SCPS es el que presentó valores mayores, mientras que el Bosque presentó los valores más bajos. Estos valores variaron según la profundidad y no siguen un patrón específico.

Geissert e Ibáñez (2008), encontraron en suelos de la zona cafetalera de Veracruz, que el contenido de agua a capacidad de campo varió de 31 a 35 % en suelos cafetaleros y de 23 a 30% en forestales. En las fincas los valores no registraron diferencias significativas; por horizontes, fueron en promedio de $33 \pm 5\%$ en los superficiales y de $34 \pm 5\%$ en los subsuperficiales. Esto fue diferente

respecto a los valores encontrados en el presente estudio, ya que los valores fueron entre 44 y 58%, es decir, fueron considerablemente más altos que los encontrados por los autores antes mencionados.

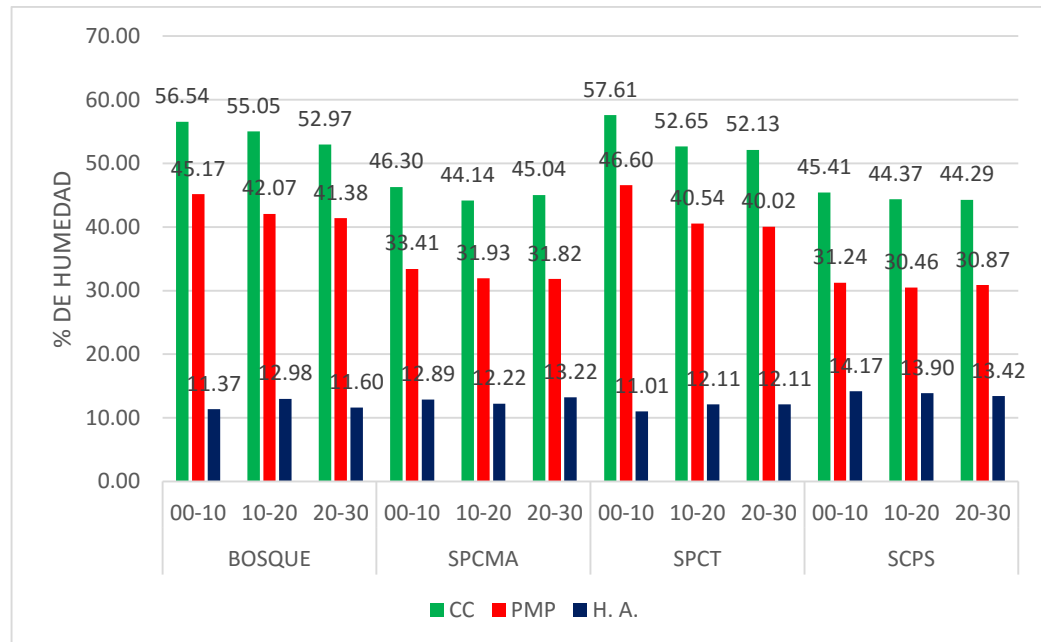


Figura 4. Comportamiento de la humedad aprovechable, la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (%) del suelo en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

Geissert e Ibáñez (2008), encontraron en suelos de la zona cafetalera de Veracruz, que el contenido de agua punto de marchitez permanente varió de 20 a 28% en suelos cafetaleros, y de 17 a 21% en los de bosque. En las fincas, el promedio fue de $24 \pm 4\%$ en los horizontes superficiales y de $25 \pm 5\%$ en los subsuperficiales. Esto fue diferente respecto a los valores encontrados en el presente estudio, ya que los valores fueron entre 30 y 47 %, es decir, fueron relativamente más altos. Los valores considerablemente elevados de punto de marchitez permanente indican que una cantidad apreciable de agua es retenida bajo fuerte tensión en el suelo y no está disponible para las plantas.

El agua realmente disponible para las plantas o humedad aprovechable (H. A) alcanzó valores de 11.01 a 13.22 % en suelos agroforestales, 11.37 a 12.98 % bajo bosque y 13.42 a 14.17 en café a pleno sol.

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto a la capacidad de campo y al punto de marchitamiento permanente, se encontró que no hubo diferencia significativa entre el SPCMA y el SCPS, así como para el Bosque y SPCT tampoco hubo diferencia significativa, pero fue significativamente diferente entre los primeros con los segundos. En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, no existieron diferencias significativas en la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), Cuadro 5.

Cuadro 5. Prueba de comparación de medias de Tukey para capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente (%), $\alpha < 0.05$, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

Agrupamiento	MEDIA		N	SISTEMA	Agrupamiento	MEDIA		N	PROF
	CC	PMP				CC	PMP		
A ^z	54.85	42.87	9	BOSQUE	A	51.46	39.10	12	00-10
A	54.13	42.38	9	SPCT	A	49.05	36.25	12	10-20
B	45.16	32.38	9	SPCMA	A	48.60	36.02	12	20-30
B	44.68	30.85	9	SCPS					

^z Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

4.2. Propiedades químicas

El análisis de las propiedades químicas del suelo fue realizado con el fin de caracterizar cada uno de los sistemas en cuanto a su condición nutrimental en las diferentes profundidades, a fin de establecer el efecto de los diferentes sistemas sobre las propiedades químicas del suelo.

4.2.1 pH

El análisis de varianza mostró que para el potencial de hidrogeno (pH), se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P < 0.0001$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 5 se aprecia que el sistema con un menor pH fue el Bosque, siguiéndole el SPCT y el SCPS. El sistema con los valores más altos de pH fue el SPCMA. Parámetro que se comportó de manera similar a la densidad aparente del suelo. Se puede observar que en el pH no existió relación directa con la profundidad del suelo.

Brady y Weil (1999) mencionan que la capacidad para absorber los elementos minerales que presenta la vegetación influye significativamente sobre las características de los suelos en donde se desarrolla y que el pH que influye directamente en la asimilación de los nutrimentos.

Geissert e Ibáñez (2008), encontraron en suelos de la zona cafetalera de Veracruz, que el ambiente químico se caracterizó por una fuerte acidez, con un pH de 4.5 a 5.2 en los suelos cafetaleros y de 4.0 a 4.5 en los forestales. La acidez se relacionó con la baja saturación del complejo de adsorción en bases intercambiables, principalmente en calcio, pero también en potasio y magnesio. En un estudio realizado en el municipio de Jitotol, Chiapas donde se evaluó las diferencias en las características del suelo en cafetales con sombra monoespecífica y sombra rustica se encontró que el valor de pH osciló entre 5.2 ± 0.4 y 5.3 ± 0.4 para café con sombra de *Inga sp.*, y sistemas con sombra rustica respectivamente (Romero-Alvarado *et al.*, 2002).

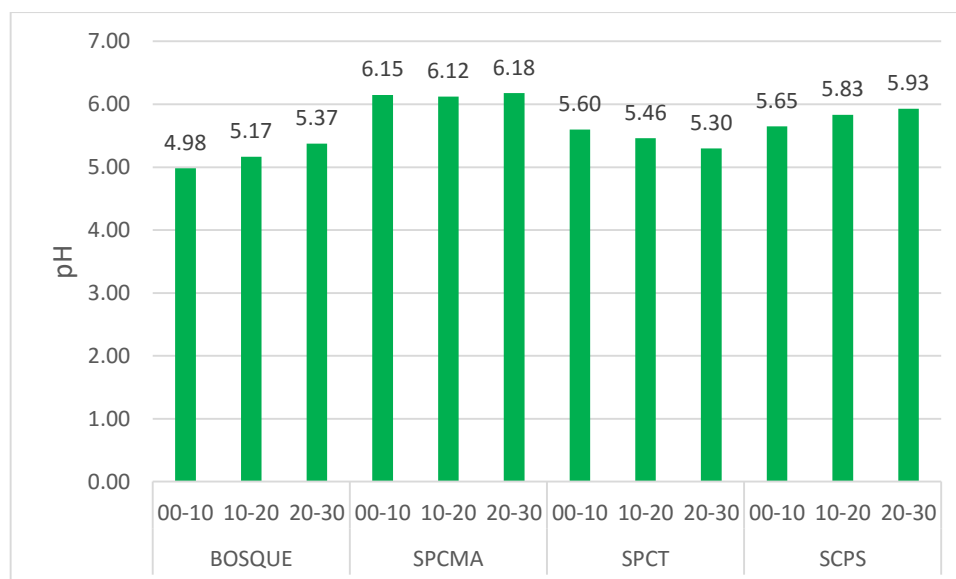


Figura 5. Comportamiento del potencial de hidrógeno del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

En ambos casos, los valores del pH coincidieron con los encontrados en la investigación, los valores más bajos encontrados en este estudio pueden deberse a las diferencias en los contenidos de materia orgánica ya que ésta acidifica el suelo (Ortiz, 1990). Como lo muestra el caso del Bosque y del SPCT, en el presente estudio.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de pH se encontró que todos los sistemas, se clasifican dentro de suelos moderadamente ácidos (Cuadro 6).

Cuadro 6. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de potencial de hidrógeno con base en NOM-021-RECNAT-2000.

Categoría	pH
Fuertemente ácido	< 5.0
Moderadamente ácido	5.1 - 6.5
Neutro	6.6 - 7.3
Medianamente alcalino	7.4 - 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al pH, se encontró que hubo diferencia significativa entre todos los sistemas. Los valores medios sobre los sistemas encontrados fueron de 6.14, 5.80, 5.45 y 5.17 % para SPCMA, SCPS, SPCT y Bosque respectivamente.

En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, no existieron diferencias significativas en la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$).

4.2.2 Capacidad de Intercambio Catiónico

El análisis de varianza mostró que para la capacidad de intercambio catiónico (CIC), se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P = 0.0303$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 6 se aprecia que el sistema con una menor capacidad de intercambio catiónico fue el SCPS, siguiéndole el SPCMA y el SCPT. El sistema con los valores más altos de capacidad de intercambio catiónico fue el Bosque. Conforme aumentó la profundidad los valores de la capacidad de intercambio catiónico disminuyeron.

Geissert e Ibáñez (2008), encontraron en suelos de la zona cafetalera de Veracruz, que la capacidad del suelo para disponer nutrimentos para las plantas (medida por la CIC), es de baja a media, con valores de 13.6 a 23.1 Cmol (+) kg⁻¹ en suelos de cafetal y de 14.7 a 18.4 Cmol (+) kg⁻¹ en forestales.

En este caso, los valores encontrados en el presente estudio difieren, con los valores encontrados por los autores antes mencionados, ya que los valores encontrados varían entre 41.70 a 46.68 Cmol (+) kg⁻¹, siendo muy altos. En

consecuencia, se puede concluir que el ambiente químico natural de los suelos estudiados demuestra ser propicio para que exista una adecuada disponibilidad de diversos nutrimentos para las plantas.

La CIC depende de la textura del suelo y del contenido de materia orgánica. En general, entre más arcilla y materia orgánica en el suelo, la capacidad de intercambio es mayor (Essington, 2004; Roy *et al.*, 2006). En este caso en los suelos donde había mayor concentración de materia orgánica que fue el Bosque y el SPCT la capacidad de intercambio catiónico fue mayor. Lo mismo sucedió con la profundidad, a medida que aumentó la profundidad disminuyó la materia orgánica y por consiguiente la capacidad de intercambio catiónico.

En general, en la mayoría de los suelos la CIC aumenta cuando se presentan incrementos en el pH (Ortega, 1981). En el presente caso no sucedió de esta manera.

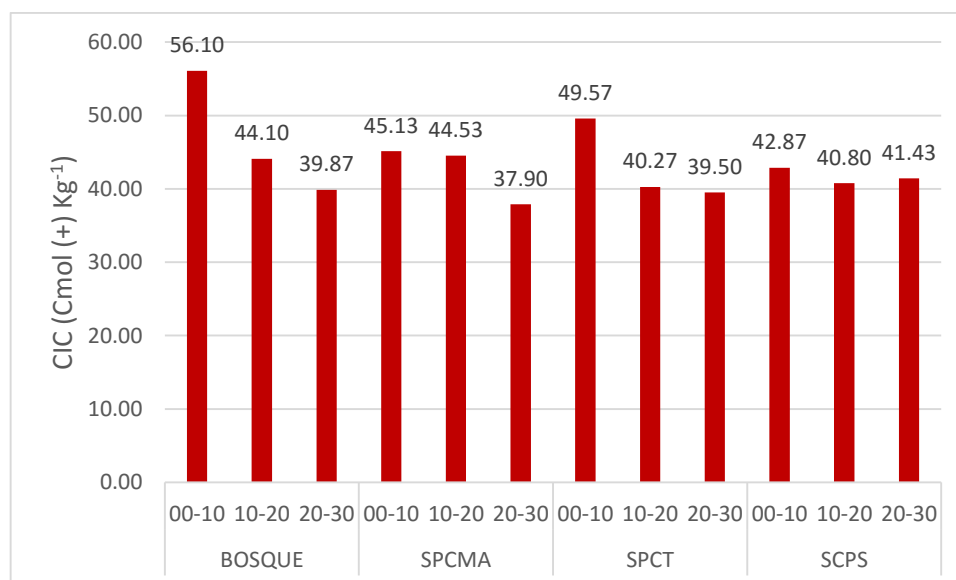


Figura 6. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico (Cmol (+) Kg⁻¹) del suelo en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de capacidad de intercambio catiónico se encontró que todos los sistemas se clasificaron dentro de muy alta (Cuadro 9.)

Cuadro 7. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de capacidad de intercambio catiónico en base a la NOM-021-RECNAT-2000.

Clase	CIC (Cmol (+) Kg ⁻¹)
Muy baja	< 5.0
Baja	5 - 15
Media	15 - 25
Alta	25 - 40
Muy alta	> 40

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto a la capacidad de intercambio catiónico, se encontró que no hubo diferencia significativa entre todos los sistemas. Los valores medios sobre los sistemas encontrados fueron de 46.68, 43.11, 42.52 y 41.70 (Cmol (+) Kg⁻¹) para Bosque, SPCT, SPCMA y SCPS respectivamente.

En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, existieron diferencias significativas en la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), dados los valores a las profundidades 10-20 cm (48.17 Cmol (+) Kg⁻¹) y 20-30 cm (42.42 Cmol (+) Kg⁻¹) no hubo diferencias significativas entre ellos, pero si con respecto a la profundidad 0-10 cm (39.67 Cmol (+) Kg⁻¹).

4.2.3 Materia Orgánica

El análisis de varianza mostró que para la materia orgánica (MO), se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P < 0.0001$, en los cuatro

sistemas evaluados (Anexo 1). En la Figura 7 se aprecia que el sistema con un menor porcentaje de materia orgánica fue el SCPS, siguiéndole el SPCMA y el SPCT. El sistema con los porcentajes más altos de materia orgánica fue el Bosque, parámetro que se asoció a la cubierta vegetal.

Se aprecia que en el caso del efecto de la profundidad sobre la materia orgánica, a medida que está se incrementó la materia orgánica disminuyó para todos los sistemas. Lo anterior está de acuerdo con lo encontrado con Ortega, (1981). Esto se debió a que la materia orgánica se acumula principalmente en la superficie del suelo.

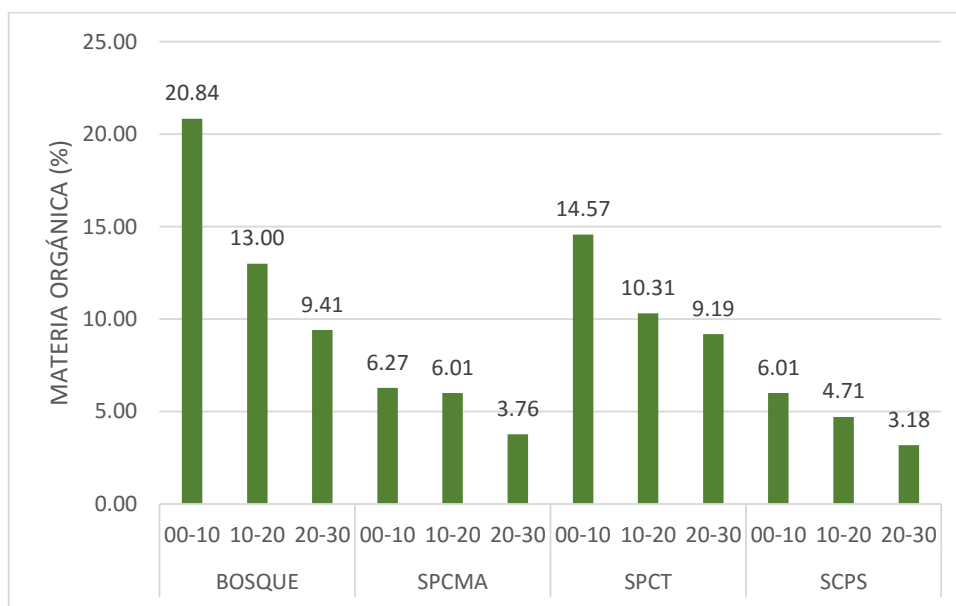


Figura 7. Concentración (%) de materia orgánica del suelo en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

Alvarado (2007), reportó valores de materia orgánica en suelos cafetaleros de 5.7 a 15.7% y en los bosques entre 4.4 a 11.4% para Jaltenango, Chiapas. Soto-Pinto (2000) reportó una media de 7.1% de materia orgánica para el norte de Chiapas. Estos valores coincidieron con los encontrados en el presente estudio.

Los altos contenidos de materia orgánica pueden deberse a las altas tasa de caída de hojarasca del dosel, así como el reflejo de que las prácticas de manejo de todos los sistemas incluyendo el SCPS no han sido tan intensos como para afectar los contenidos de materia orgánica.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de materia orgánica se encontró que el SCPS y el SPCMA tuvieron un porcentaje de materia orgánica bajo, mientras que el bosque y el SPCT tuvieron un porcentaje de materia orgánica alto (Cuadro 8).

Cuadro 8. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de la materia orgánica en base a la NOM-021-RECNAT-2000.

Clase	Materia orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	< 4.0	< 0.5
Bajo	4.1 - 6.0	0.6 - 1.5
Medio	6.1 - 10.9	1.6 - 3.5
Alto	11.0 - 16.0	3.6 - 6.0
Muy Alto	> 16.1	> 6.0

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto a la materia orgánica, se encontró que no hubo diferencia significativa entre el SPCMA y el SCPS, pero si se encontraron diferencias significativas respecto al SPCT y al Bosque, estos a su vez fueron significativamente diferentes.

Se encontró que a mayor intensidad de uso del suelo, la materia orgánica disminuyó. Esto coincidió con lo reportado por Pennock y Kessel (1977), quien ha señalado que la perturbación de los suelos de los bosque provoca una disminución en sus contenidos orgánicos, ya que la cobertura vegetal disminuye,

por consiguiente existe una mayor temperatura que favorece una mayor actividad microbiana y una rápida mineralización y por consiguiente su pérdida.

En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, dados los valores a las profundidades 10-20 y 20-30 cm no existieron diferencias significativas entre ellos, pero si con respecto a la profundidad 0-10 cm en la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), Cuadro 9.

Cuadro 9. Prueba de comparación de medias de Tukey, para materia orgánica (%), $\alpha < 0.05$), en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

Agrupamiento	Media	N	SISTEMA	Agrupamiento	Media	N	PROF
A	14.41	9	BOSQUE	A	11.92	12	00-10
B	11.35	9	SPCT	B	8.50	12	10-20
C	5.34	9	SPCMA	B	6.38	12	20-30
C	4.63	9	SCPS				

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

4.2.4 Nitrógeno total

El análisis de varianza mostró que para el nitrógeno total, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P < 0.001$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 8 se aprecia que el sistema con un menor % de nitrógeno total fue el, SCPS siguiéndole el SPCMA y el SPCT. El sistema con los valores más altos de nitrógeno total fue el Bosque. Esto está relacionado de manera directa con el comportamiento de la materia orgánica, explicado anteriormente.

Se aprecia que en el caso del efecto de la profundidad sobre el nitrógeno total, a medida que está se incrementa, el nitrógeno total disminuye considerablemente. Romero-Alvarado *et al.* (2002), al comparar contenidos de nitrógeno total en cafetales con sombra monoespecífica y cafetales con sombra diversa

encontraron valores de 5.4 ± 0.3 y 7.2 ± 0.2 respectivamente en el Estado de Chiapas, resultados que son similares a los encontrados en este estudio.

Geissert e Ibáñez (2008), encontraron en suelos de la zona cafetalera de Veracruz, que el nitrógeno total en los suelos bajo cafetal fue alto (2.39 a 2.92 g kg⁻¹). En los suelos de bosque, el contenido fue muy alto, variando entre 4.0 y 4.4 g kg⁻¹. Esto no fue similar para el presente estudio.

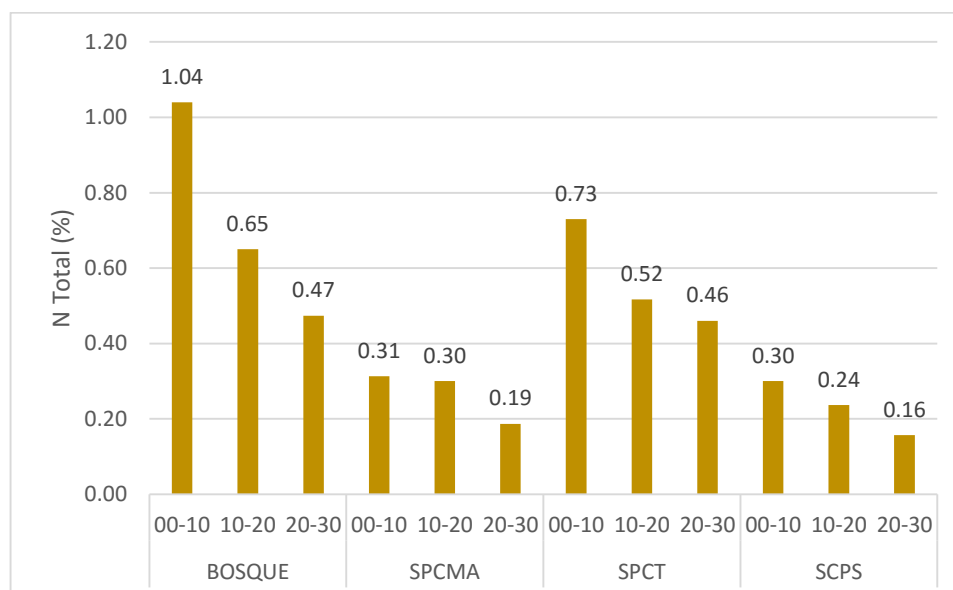


Figura 8. Concentración del nitrógeno total (%) del suelo en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

El nitrógeno mineral tiene una mayor dinámica que el nitrógeno total, por lo que su comportamiento en ocasiones difiere. Sin embargo, en el caso del suelo de Bosque se presentó la coincidencia de que el nitrógeno mineral fue más alto que en el suelo de los otros sistemas al igual que el nitrógeno total. Esto se debió a que quien dirige las concentraciones de nitrógeno total y mineral en sistemas no tan perturbados es el contenido de materia orgánica.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de nitrógeno total se

encontró que el SCPS tiene un % de nitrógeno total alto, mientras que el Bosque, el SPCMA y el SPCT tienen un % de nitrógeno total muy alto (Cuadro 10).

Cuadro 10. Interpretación del contenido de nitrógeno total, en base a la NOM-021-RECNAT-2000.

Clase	N total %
Muy bajo	< 0.05
Bajo	0.05 - 0.10
Medio	0.10 - 0.15
Alto	0.15 - 0.25
Muy alto	> 0.25

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al nitrógeno total, el SCPS y el SPCMA no son significativamente diferentes, pero si se encontraron diferencias significativas respecto al SPCT y al Bosque, estos a su vez fueron significativamente diferentes. Los valores medios sobre las profundidades y las repeticiones encontrados fueron de 0.72, 0.56, 0.26 y 0.23% para Bosque, SPCT, SPCMA y SCPS respectivamente. En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, existieron diferencias significativas, dados los valores a las profundidades 10-20 cm (0.42%) y 20-30 cm (0.31%) no hubo diferencias significativas entre ellos, pero si con respecto a la profundidad 0-10 cm (0.59%) en la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$).

4.2.5 Nitrógeno Mineral

El análisis de varianza mostró que para el nitrógeno mineral, se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P = 0.001$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 9 se aprecia que el sistema con un menor % de nitrógeno mineral fue el SPCMA, siguiéndole el SCPS y el SPCT. El sistema con los valores más altos de nitrógeno mineral fue el Bosque.

Se aprecia que en el caso del efecto de la profundidad sobre el nitrógeno mineral, a medida que está se incrementó el nitrógeno mineral disminuyó para el Bosque y SPCT. En el caso del SCPS y el SPCMA el comportamiento del nitrógeno mineral no siguió un patrón definido. En la profundidad 0-10 cm tuvo un comportamiento que se relaciona con los contenidos de materia orgánica y nitrógeno total.

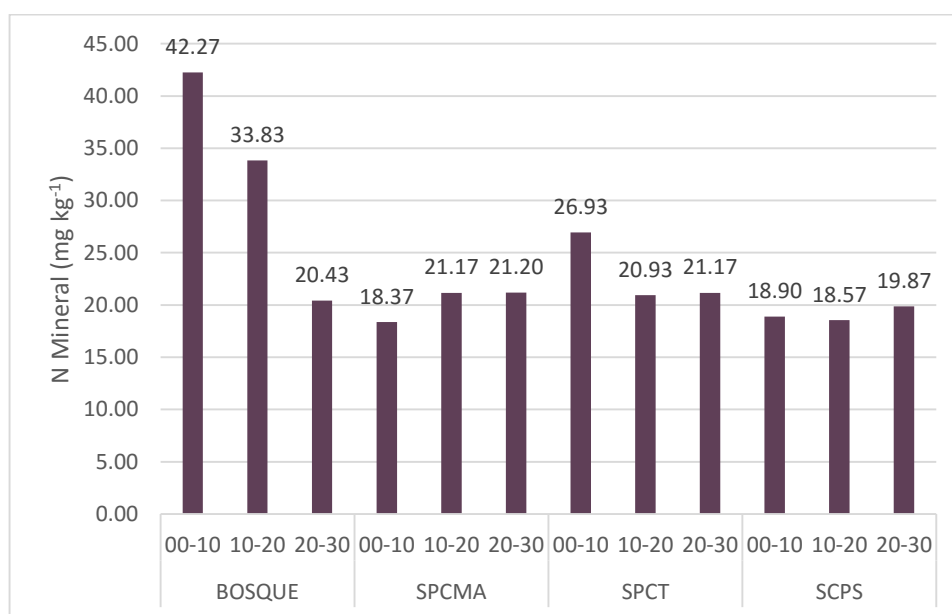


Figura 9. Concentración del nitrógeno mineral (mg Kg⁻¹) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de nitrógeno mineral se encontró que el SCPS tuvo un contenido de nitrógeno mineral bajo, mientras

que el Bosque, el SPCMA y el SPCT tuvieron un contenido de nitrógeno mineral medio (Cuadro 11).

Cuadro 11. Clasificación de fertilidad de suelos en función del nitrógeno mineral, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.

Clase	N inorgánico en mg Kg ⁻¹
Muy bajo	0 - 10
Bajo	10 - 20
Medio	20 - 40
Alto	40 - 60
Muy alto	> 60

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al nitrógeno mineral, se encontró que el SCPS, SPCT y el SPCMA no fueron significativamente diferentes. En el caso del Bosque fue significativamente diferente a los otros sistemas. Los valores medios sobre los sistemas encontrados fueron de 32.17, 23.01, 20.24 y 19.11 mg Kg⁻¹ para Bosque, SPCT, SPCMA y SCPS respectivamente.

En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, no existieron diferencias significativas en la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$).

4.2.5 Fosforo

El análisis de varianza mostró que para el fosforo (P) se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P = 0.0054$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 10 se aprecia que el sistema con una menor concentración de fosforo fue el Bosque, siguiéndole el SPCMA y el SPCT. El sistema con los valores más altos de fosforo fue el SCPS.

Se aprecia que en el caso del efecto de la profundidad sobre el fósforo, a medida que está se incrementó el fósforo disminuyó para el SPCMA y el SCPS. En el caso del Bosque y el SPCT el comportamiento del fósforo, no siguió un patrón definido.

En cuanto a los contenidos de fósforo todos los sistemas se clasificaron como bajos, se observó una tendencia en cuanto a la intensidad de uso del SCPS.

Además en algunos estudios se ha visto que los contenidos de fósforo varían considerablemente de acuerdo a las condiciones climáticas en que se toman las muestras en campo (Alvarado, 2007).

Geissert e Ibáñez (2008), encontraron valores en contenido de fósforo 1.75, 9.07, 5.96, 0.19, 0.68, 0.10, 2.22 mg kg^{-1} en sistema de café rusticano, policultivo tradicional, policultivo comercial, monocultivo con sombra especializada, a pleno sol y los dos últimos en bosque mesófilo de montaña respectivamente en las regiones de Coatepec y Huatusco, Veracruz.

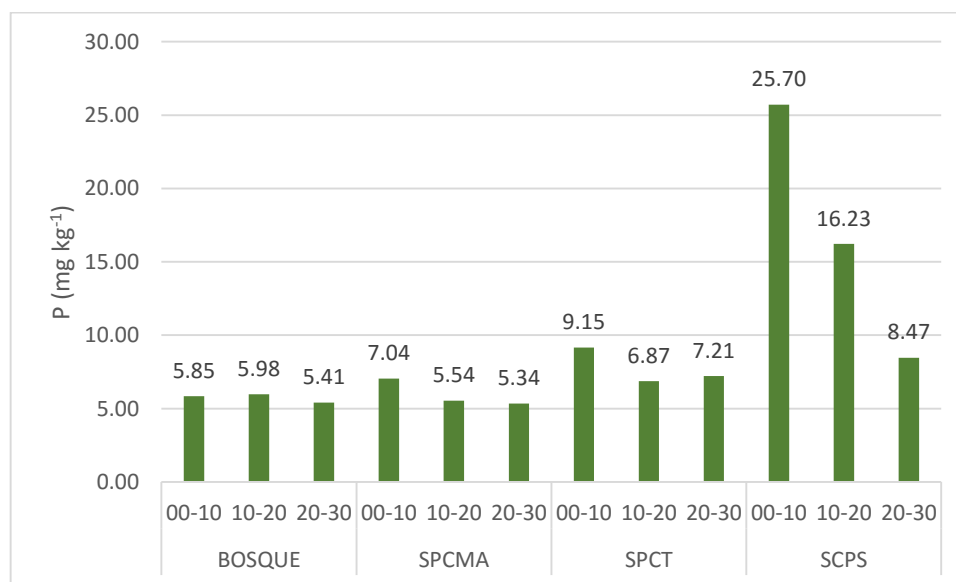


Figura 10. Concentración del fósforo (mg Kg^{-1}) del suelo en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

En Chiapas, Romero-Alvarado *et al.* (2002), encontraron que el fósforo osciló entre 4.8 ± 4.2 y 2.4 ± 2.0 mg kg⁻¹ para café con sombra de Inga sp., y sistemas con sombra rustica respectivamente.

Alvarado (2007), encontró valores bajos de fósforo de 1 y 4 mg kg⁻¹ para temporada de lluvias y secas en un rango de altitud de 811 a 1044 m en suelos de bosque. Todos estos resultados coinciden con los encontrados en este estudio.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de fosforo, se encontró que el SCPS tuvo un contenido de fosforo medio, mientras que el Bosque, el SPCMA y el SPCT tuvieron un contenido de fosforo bajo (Cuadro 18).

Cuadro 12. Criterios para determinar la calidad de un suelo en cuanto a su contenido de fosforo en base a la NOM-021-RECNAT-2000.

Clase	P Mg Kg ⁻¹
Bajo	< 15
Medio	15 - 30
Alto	➤ 30

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al fosforo, se encontró que no hubo diferencia significativa entre el Bosque, el SPCT y el SPCMA. En el caso del SCPS fue significativamente diferente a los otros sistemas. Los valores medios sobre los sistemas encontrados fueron de 16.79, 7.74, 5.97 y 5.74 mg Kg⁻¹ para SCPS, SPCT, SPCMA y Bosque respectivamente. En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, no existieron diferencias significativas con respecto a la profundidad de 0-10 cm (11.93 mg Kg⁻¹) y 10-20 cm (8.65 mg Kg⁻¹) y a la profundidad de 10-20 cm con la de 20-30 cm (6.60 mg

Kg⁻¹), pero si lo hubo entre las profundidades 0-10 y 20-30 cm en la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$).

El fósforo no presentó ninguna relación con las variables de materia orgánica, densidad aparente, pH y nitrógeno.

En el sistema de café a pleno sol los valores de fosforo fueron altos, debido a que en Veracruz el cafetal es intensivamente manejado, usualmente con la aplicación de fertilizantes, lo que propicia cambios significativos en los contenidos de nutrimentos.

4.2.6 Bases intercambiables

El análisis de varianza mostró que para las bases intercambiables (K, Ca, Mg) se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), para el potasio con $P = 0.0029$, para el calcio y magnesio con $p < 0.0001$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 11 se aprecia que el sistema con una menor concentración de potasio, calcio y magnesio fue el Bosque. El sistema con los valores más altos de potasio y calcio fue el SCPS, mientras que el SPCMA es el que presentó valores mayores de magnesio. Se aprecia que en el caso del efecto de la profundidad sobre el potasio y el calcio, a medida que está se incrementó el potasio y el calcio disminuyeron en todos los sistemas. En el Bosque y el SPCT se apreció que conforme aumentó la profundidad, disminuyó los valores del magnesio, pero los otros sistemas este comportamiento no siguió un patrón definido.

Vergara (2003), menciona que los iones intercambiables potasio, calcio y magnesio tienen una estrecha relación con el pH. En este estudio esa relación fue de esta manera, ya que el Bosque y el SPCT tienen los valores más bajos de pH, pero también de bases intercambiables.

Los valores encontrados de bases intercambiables, indicaron que existió una pérdida de nutrimentos, arrastrados por la gran cantidad de agua de lluvia que provoca lixiviación.

Geissert e Ibáñez (2008), encontraron que la saturación en bases varió de 33.9% a 40.4% en suelos cafetaleros, y de 21.4% a 26.4% en los forestales, en las regiones de Coatepec y Huatusco, Veracruz. Situación similar a lo ocurrido en el presente estudio.

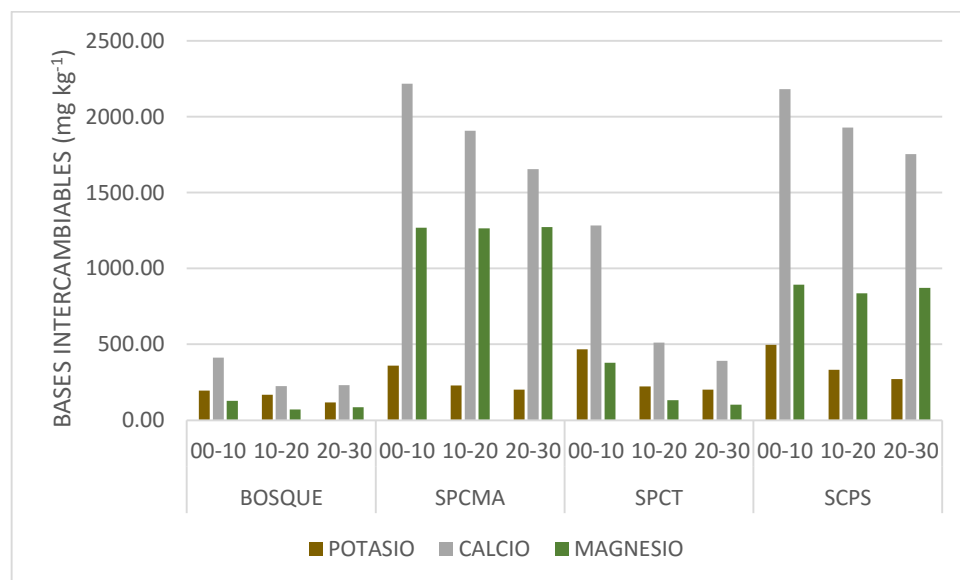


Figura 11. Concentración de bases intercambiables (mg Kg⁻¹) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de potasio se encontró que el Bosque (0.41 Cmol(+) Kg⁻¹) tuvo un contenido de potasio medio,

mientras que el SPCMA ($0.67 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$), el SPCT ($0.76 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) y el SCPS ($0.93 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) tuvieron un contenido de potasio alto. El Bosque ($0.74 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) tuvo un contenido de calcio muy bajo, mientras que el SPCT ($1.86 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) y el SPCMA ($4.94 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) tuvieron un contenido de calcio bajo y el SCPS ($5.01 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) tuvo un contenido de calcio medio. El Bosque ($0.24 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) tuvo un contenido de magnesio muy bajo, el SPCT ($0.52 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) tuvo un contenido de magnesio bajo, el SPCMA ($2.22 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) tuvo un contenido de magnesio medio y el SCPS ($3.25 \text{ Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$) tuvo un contenido de magnesio alto (Cuadro 13).

Cuadro 13. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de las bases intercambiables, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.

Clase	K ($\text{Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$)	Ca ($\text{Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$)	Mg ($\text{Cmol}(+) \text{ Kg}^{-1}$)
Muy baja	< 0.2	< 2	< 0.5
Baja	0.2 - 0.3	2 - 5	0.5 - 1.3
Media	0.3 - 0.6	5 - 10	1.3 - 3.0
Alta	> 0.6	> 10	> 3.0

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al potasio, se encontró que el Bosque, el SPCMA y el SPCT no fueron significativamente diferentes, de igual manera no se encontraron diferencias significativas en el SPCMA, el SPCT y el SCPS, pero si hubo diferencia significativa entre el SCPS y el Bosque.

En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, no existieron diferencias significativas con respecto a la profundidad de 10-20 y 20-30 cm, pero si lo hubo entre las profundidades 10-20 y 20-30 cm con la profundidad 0-10 cm en la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), Cuadro 14.

Cuadro 14. Prueba de comparación de medias de Tukey, para potasio (mg Kg^{-1} , $\alpha < 0.05$), en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz, México.

Agrupamiento	Media	N	SISTEMA	Agrupamiento	Media	N	PROF
A ^z	366.44	9	SCPS	A	379.67	12	00-10
B A	296.67	9	SPCT	B	237.50	12	10-20
B A	263.11	9	SPCMA	B	197.50	12	20-30
B	160.00	9	BOSQUE				

^z Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al calcio, el SCPS y el SPCMA no fueron significativamente diferentes, pero si hubo diferencia significativa entre el SPCT y el Bosque y entre estos con los otros sistemas. Los valores medios sobre las profundidades y las repeticiones encontrados fueron de 1955.0, 1926.9, 728.4 y 290.0 mg Kg⁻¹ para SCPS, SPCMA, SPCT y Bosque respectivamente. En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, no existieron diferencias significativas en la comparación de medias, con respecto a la profundidad de 10-20 cm (1143.33 mg Kg⁻¹) y 20-30 cm (1007.92 mg Kg⁻¹), pero si lo hubo entre las profundidades 10-20 y 20-30 cm con la profundidad 0-10 cm (1524.00 mg Kg⁻¹).

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al magnesio, el SPCT y el Bosque no fueron significativamente diferentes, pero si hubo diferencia significativa entre el SPCMA y el SCPS y entre estos con los otros sistemas. Los valores medios sobre las profundidades y las repeticiones encontrados fueron de 1269.00, 867.44, 204.67 y 94.89 mg Kg⁻¹ para SPCMA, SCPS, SPCT y Bosque respectivamente. En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, no existieron diferencias significativas en la comparación de medias.

4.2.8 Microelementos

El análisis de varianza mostró que para los microelementos (Cu, Fe, Zn, Mn) se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), para el hierro, zinc y manganeso con $p < 0.0001$, para el cobre con $P = 0.0432$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 12 se aprecia que el sistema con una menor concentración de cobre, zinc y manganeso fue el Bosque y el SPCT para el hierro. El sistema con los valores más altos de hierro y cobre fue el SCPS, mientras que el SPCMA es el que presentó valores mayores de zinc y manganeso.

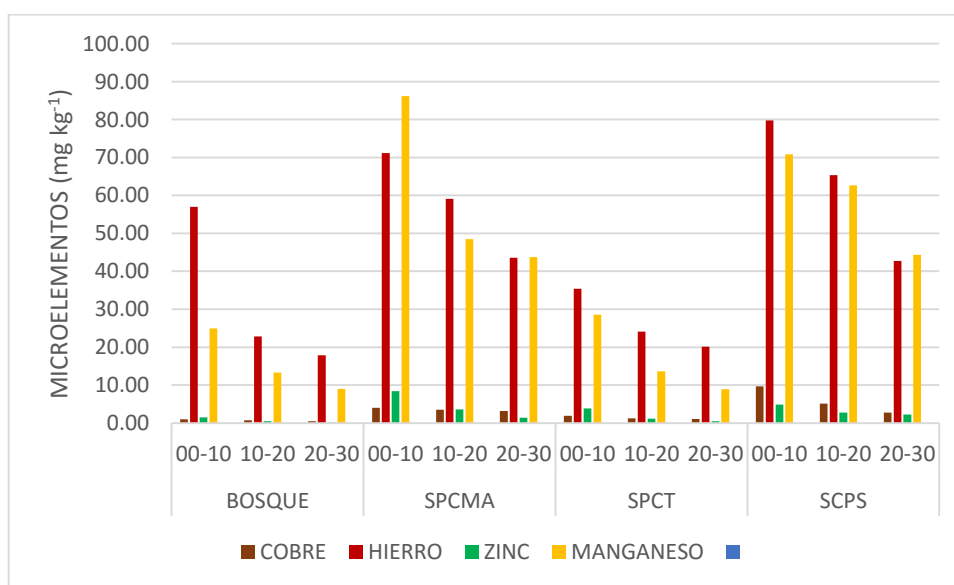


Figura 12. Concentración de los microelementos (Cu, Fe, Zn, Mn, mg Kg⁻¹) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

Se aprecia que en el caso del efecto de la profundidad sobre todos los microelementos, a medida que está se incrementó los microelementos disminuyeron en todos los sistemas.

Según los valores dados por la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de cobre, hierro y manganeso, se encontró que todos los sistemas tuvieron un valor adecuado. El Bosque tuvo un contenido de zinc marginal, mientras que los demás sistemas tuvieron un valor adecuado de zinc (Cuadro 15).

Cuadro 15. Clasificación del suelo de acuerdo al valor de micronutrientes, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.

Clase	Fe mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹
Deficiente	< 2.5	< 0.2	< 0.5	< 1.0
Marginal	2.5 - 4.5		0.5-1.0	
Adecuado	> 4.5	➤ 0.2	> 1.0	> 1.0

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al cobre, el SPCMA, el SPCT y el Bosque no fueron significativamente diferentes, el SCPS y el SPCMA no fueron significativamente diferentes, pero si hubo diferencia significativa entre el Bosque y el SPCT con el SCPS. Los valores medios sobre las profundidades y las repeticiones encontrados fueron de 5.82, 3.55, 1.37 y 0.73 mg Kg⁻¹ para SCPS, SPCMA, SPCT y Bosque respectivamente. En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, no existieron diferencias significativas en la comparación de medias.

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al hierro, zinc y manganeso, el SPCMA y el SCPS no fueron significativamente diferentes, y el SPCT con el Bosque no fueron significativamente diferentes, pero si hubo diferencia significativa entre los primeros con los segundos. Los valores medios sobre las profundidades y las repeticiones encontrados para el hierro fueron de 62.62, 57.94, 32.56 y 26.51 mg Kg⁻¹ para SCPS, SPCMA, Bosque y SPCT respectivamente. Los valores medios sobre las profundidades y las repeticiones

encontrados para el zinc fueron de 4.45, 3.28, 1.83 y 0.71 mg Kg⁻¹ para SPCMA, SCPS, SPCT y Bosque respectivamente. Los valores medios sobre las profundidades y las repeticiones encontrados para el manganeso fueron de 59.46, 59.26, 17.04 y 15.76 mg Kg⁻¹ para SPCMA, SCPS, SPCT y Bosque respectivamente.

En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, existieron diferencias significativas en la comparación de medias para el hierro, en todas las profundidades, 60.82, 42.84 y 31.07 mg Kg⁻¹ para 0-10, 10-20 y 20-30 cm respectivamente.

En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, existieron diferencias significativas en la comparación de medias para el zinc, en la profundidad 10-20 cm (1.99 mg Kg⁻¹) y 20-30 cm (1.05 mg Kg⁻¹) no hubo diferencias significativas, pero si entre estas y la profundidad de 0-10 cm (4.65 mg Kg⁻¹).

En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, existieron diferencias significativas en la comparación de medias para el manganeso, en la profundidad 10-20 cm (34.52 mg Kg⁻¹) y 20-30 cm (26.49 mg Kg⁻¹) no hubo diferencias significativas, pero si entre estas y la profundidad de 0-10 cm (52.63 mg Kg⁻¹).

El análisis de varianza mostró que para el boro (B) se encontraron diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0.05$), con $P = 0.0452$, en los cuatro sistemas evaluados (Anexo 1).

En la Figura 13 se aprecia que el sistema con una menor concentración de boro fue el SPCMA, siguiéndole el SCPS y el Bosque. El sistema con los valores más

altos de boro fue el SPCT. Se aprecia que en el caso del efecto de la profundidad sobre el boro, a medida que está se incrementó boro disminuyó en todos los sistemas.

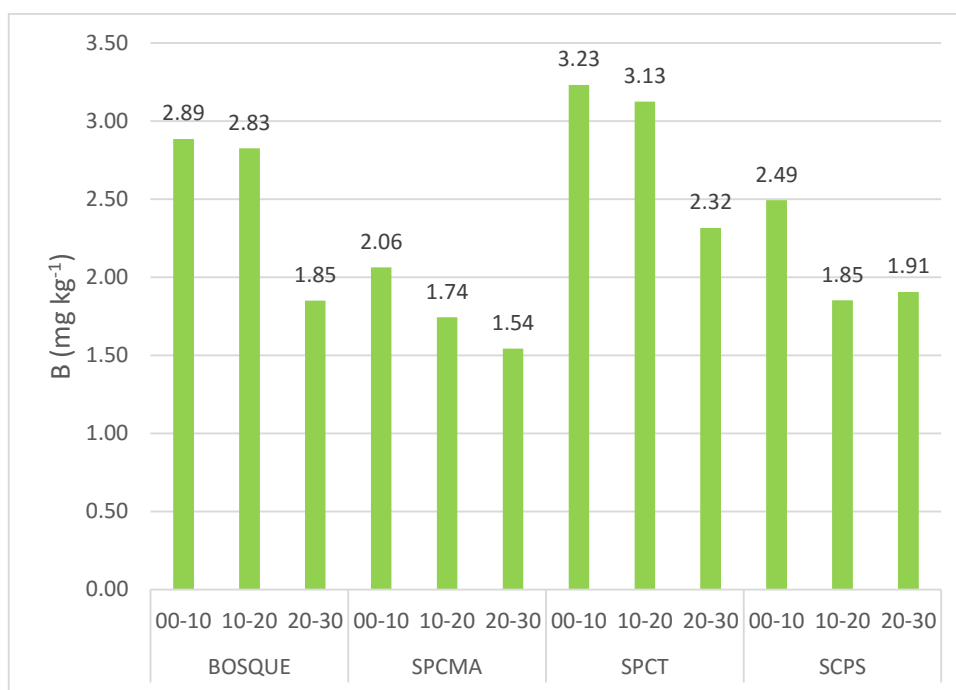


Figura 13. Concentración del boro (mg Kg⁻¹) del suelo, en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz.

De acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, y a los valores de boro, nos indica que el SPCMA y el SCPS tuvieron un valor alto de boro, mientras que el Bosque y el SPCT tuvieron un valor muy alto de boro (Cuadro 16).

Cuadro 16. Clasificación del suelo en cuanto a su valor del boro, con base en la NOM-021-RECNAT-2000.

Clase	B mg kg ⁻¹
Muy bajo	< 0.39
Bajo	0.39 - 0.79
Medio	0.80 - 1.29
Alto	1.30 - 2.10
Muy alto	> 2.10

Al realizar la comparación de medias (Tukey, $\alpha < 0.05$), con respecto al boro, se encontró que no hubo diferencia significativa entre el SPCMA, el SCPS y el Bosque, tampoco hubo diferencia significativa entre el SPCT, el Bosque y el SCPS, pero si se encontraron diferencias significativas entre al SPCT y el SPCMA.

En cuanto a los valores medios sobre las profundidades, dados los valores a las profundidades 10-20 y 20-30 cm no hubo diferencias significativas, y en las profundidades 0-10 con 10-20 cm no hubo diferencias significativas, pero si entre la profundidad 0-10 cm y la profundidad de 20-30 cm (Cuadro 17).

Cuadro 17. Prueba de comparación de medias de Tukey, para boro (mg Kg^{-1} , $\alpha < 0.05$), en los sistemas estudiados, en Huatusco Veracruz, México.

Agrupamiento	Media	N	SISTEMA	Agrupamiento	Media	N	PROF
A ^z	2.89	9	SPCT	A	2.66	12	00-10
B A	2.52	9	BOSQUE	B A	2.38	12	10-20
B A	2.08	9	SCPS	B	1.90	12	20-30
B	1.78	9	SPCMA				

^z Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

5. CONCLUSIONES

Aunque el suelo del sistema con café a pleno sol presentó densidades aparentes y texturas similares a los sistemas natural y agroforestal con café, éste presentó una menor capacidad de retención de agua expresada por menores valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente. El suelo del bosque fue el que presentó los valores más altos de dichos parámetros, los suelos de los sistemas agroforestales de producción café tradicional y de producción Café-Macadamia-Aguacate tuvieron valores intermedios.

El pH del suelo bajo los sistemas de bosque, sistemas agroforestales y monocultivo de café, fue ácido, siendo más acentuada la acidez a medida que se incrementó la concentración de materia orgánica. En el caso de los suelos donde se tuvo mayor concentración de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico fue mayor. Conforme aumentó la profundidad los valores de la capacidad de intercambio catiónico disminuyeron debido a la disminución de los contenidos de materia orgánica. La concentración de la materia orgánica, dependió de la cubierta vegetal y la profundidad.

La concentración de nitrógeno total en los sistemas fueron altos y muy altos. Esto estuvo relacionado de manera directa con el comportamiento de la materia orgánica.

De manera general el comportamiento del nitrógeno mineral difirió en comparación con el nitrógeno total, sin embargo, en el caso del suelo de bosque el nitrógeno mineral tuvo un comportamiento similar al del nitrógeno total. Esto se debió a que quien provocó las concentraciones de nitrógeno total y mineral en sistemas no tan perturbados fue el contenido de materia orgánica.

La concentración de fósforo no tuvo relación con las concentraciones de materia orgánica y nitrógeno, y los valores de pH.

Se tuvo efecto de la profundidad sobre el potasio y el calcio, pues a medida que está se incrementó las concentraciones del potasio y el calcio disminuyeron en todos los sistemas.

Se tuvo efecto de la profundidad sobre todos los microelementos, pues a medida que está se incrementó, la concentración de los microelementos disminuyó en todos los sistemas.

De manera general se concluye que el bosque fue el mejor, seguido del sistema de producción café tradicional y del sistema de producción Café-Macadamia-Aguacate y el sistema de café a pleno sol fue el más deficiente. Los sistemas agroforestales (SPCT y SPCMA), propiciaron una mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo, con respecto al sistema de café a pleno sol.

El establecimiento del monocultivo de café propició una disminución de la concentración de materia orgánica y nitrógeno, menor capacidad de retención de agua, y un aumento en la concentración de bases intercambiables y microelementos.

6. LITERATURA CITADA

Aguado-Lara G, J D Etchevers-Barra, C Hidalgo-Moreno, A Gálvis Espinola, A Aguirre-Gómez, 2002. Dinámica del potasio en suelos agrícolas. *Agrociencia* 36 (1):11-22.

Alcántar G.G y T.L. Trejo. 2007. Nutrición de cultivos. Colegio de postgraduados. Mundi Prensa. México. 451 pp.

Altieri, M., Yurjevic, A. 1991. La Agroecología y el Desarrollo Rural Sostenible en América Latina. *Agroecología y Desarrollo*. CLADES. 2 (1):25-36.

Altieri, Miguel, Yurjevic, Andrés. 1995. *Agroecología y Desarrollo*. Revista del Consorcio Latinoamericano Sobre Agroecología y Desarrollo. Santiago de Chile.

Alvarado R., J. C. 2007. Sistemas de producción de café y su impacto sobre las propiedades físicas y químicas del suelo en Nueva Palestina, Jaltenango, Chiapas, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Chiapas. Chiapas, México.

Baker K. H. and Herson D. S. 1994. *Bioremediation*. McGraw Hill Inc.

Batey, T., 1990. Control of compaction on the farm. A personal view. *Soil Technology* 3: 225–229.

- Brady, N. C. y Weil, R. R. 1999. The Nature and properties of soil. 12th edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, N. J. Pp. 639.
- Beer C. A. Harvey, M. Ibrahim, J.M. Harmand. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. En revista de las Américas. Funciones de servicio de los sistemas de Agroforestería.
- Burley J P, P Wood, 1971. Handbook for Prevenance Reserching in the Tropics. Commonwealth Forest Institute. Department Forestry, Oxford University, U. K. Tropical Forest. 10:233.
- Cano, V, N. y Arcos, H. J.1998 Monografía de Huatusco. Graphic's Huatusco, Veracruz.
- Cardona D. y S. Sadeghian.2005.Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. Cenicafé 56 (4):348-364.
- Carter, M. R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. Agronomy J. 94, 38–47.
- Cavazos, T. y Rodríguez, O. 1992. Manual de prácticas de física de suelos. Editorial trillas: ESA Hermanos Escobar. México, D. F. Pp.99.
- Crespo G. 2008. Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales Revista cubana de ciencia agrícola. 42 (4):329-335.
- Coras M., P. M. 1989. Propiedades físicas del suelo relacionadas con el riego. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Pp. 250.

CSTPA, 1980. Handbook on Reference Methods for Soil Testing. Revised Edition. Council of Soil Testing and Plant Analysis, Athens, Georgia USA. 459 p.

Cuanalo de la C.H. E., 1981. Manual de Descripción de Perfiles en el Campo. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 40 p.

De la Rosa D. 2008. Evaluación agro-ecológica de suelos para un desarrollo sostenible. Mundi prensa, Madrid, España. 404 pp.

Escamila P. E. 2011. Ponencia. Cultivo de café a pleno sol.

Escamilla P. E., A.L. Lincona V., S. Díaz C., H. V. Santoyo C., R. Sosa., y L. Rodriguez R.1994. Los sistemas de producción de café en el centro de Veracruz, México. Un análisis Tecnológico. Revista de Historia No 30.

Essington M.E. 2004. Soil and wáter chemistry, an integrative approach. CRC press. 534 pp.

Etchevers B J D, W G Espinoza, E Riquelme, 1971. Manual de Fertilidad y Fertilizantes. 2da. Ed. Corregida. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía, Chillan, Chile. 62 p.

Etchevers J. D. 1988. Análisis químico de suelos y plantas. Centro de Edafología. Colegio de Posgraduados, Chapingo, Estado de México. 803p.

FAO,1989. Carte Mondiales des Sol, Légende Révisé. Rapport sur les Ressource en Soils du Monde. FAO- UNESCO. No. 60. Rome, Italie. 125 p.

Farrel John; Altieri Miguel. Sistemas Agroforestales: En Módulo de Diseño y Manejo de Agro Ecosistemas de III Curso sobre Agroecología y Desarrollo Rural. CLADES. 1996. Lima-Perú.

- Fassbender H.W.1982. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José. Costa Rica. 398 p.
- Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. 1987. Química de Suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA, San José, Costa Rica. Pp. 420.
- Fassbender, H. W. 1992. Modelos edafológicos de los sistemas de producción agroforestal. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Pp. 185–470.
- Fassbender, H. W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2da edición. CAITE. Turrialba. Costa Rica. Pp. 490
- Foster J. 1995. Soil nitrogen. En Alef, K. and Nannipieri, P. (Eds.). Methods in applied soil microbiology and biochemistry. Academic Press.
- Gaudy A. F. y Gaudy E. T. 1981. Microbiology for environmental scientists and engineers. McGraw Hill, Tokyo
- Geissert K., D. e Ibáñez G., A. 2007. Servicios ambientales edáficos en agrosistemas cafetaleros. En Memorias. XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. León, Guanajuato. México.
- Geissert K., D. e Ibáñez G., A. 2008. Calidad y ambiente físico-químico de los suelos. In Manson R.H., Hernández-Ortiz V., Gallina S. y Mehltreter K. (editores). Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación. Instituto de Ecología A.C. (INECOL) e Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, 348 p.

Geisser, D.; Martínez, R. y Meza, E. 2000. Propiedades físicas y químicas de suelo volcánico bajo bosque y cultivo en Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 2(1): 31-34.

Giraldo L.A. 2000. Sistemas silvopastoriles para la ganadería en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 87pp.

Gobat J.M., M. Arango y W. Matthey. 2004. *The Living Soil, Fundamentals of soil science and soil biology*. Science Publishers. New Hampshire. USA. 602 p.

Hacher L. E., Kosson, D. S., Young, L. Y., Cowan, R. M. 2001. Measurement of Iron(III) bioavailability in pure iron oxide minerals and soils using anthraquinone-2,6-disulfonate oxidation. *Environ Sci Technol*. 35:4886-4893.

Harvey, C. A.; Villanueva, C. ; Villancis, J. Chacón, M. ; Muñoz, D. ; López, M.; Ibrahim, M.; Gómez, R.; Taylor, R.; Martínez, J.; Navas, A.; Sáenz, J. Sánchez, D.; Medina, A.; Vilchez, S.; Hernández, B.; Pérez, A.; Ruiz, F.; López, F.; Lang, I.; Kunth, S. y Sinclair, F. L. 2003. Contribución de las cercas vivas en la productividad e integridad ecológica de los paisajes agrícolas en América Central. *Agroforestería de las Americas* 39- 40: 30-39.

Hernández, C. H. 2013. Carbono acumulado en dos sistemas agroforestales y en un sistema de bosque de niebla. Tesis de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Chapingo, México.

Ibrahim M., 2010. Competencia en los sistemas silvopastoriles: Raíces, agua y nutrientes. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 20pp.

Instituto Mexicano del Petróleo, 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.

- Jaramillo D.F., 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Medellín, Colombia. 613 pp.
- Jiménez, F., Muschler, R., Köpsell, E., 2001. Funciones y aplicaciones de sistemas agroforestales. CATIE/GTZ. Serie materiales de enseñanza No. 46. Pp. 187.
- Krishnamurthy, L. y Ávila, M. 1999. Agroforestería Básica. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México, D. F. Pp. 29-36.
- Lal, R. 1976. Notillage effects on soil properties under different crops in western Nigeria. Soil Science 40:762-768
- Lal, R. 1996. Deforestation and land - use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. I. Soil physical and hydrological Properties. Land Degradation & Development. 7:19 - 45
- Lal R. 1999. Soil quality and soil erosion. CRC press, Boca Raton, Florida, USA. 329 pp.
- Lahav E., 1974. The influence of potassium on the content of macroelements in the banana sucker. Agrochimica 28 (1-2):194-203.
- Loveland P, J Webb (2003) Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. Soil and Tillage Res. 70(1):1-18.
- Lundgren O. y B. Raintree. 1983. Sustained agroforestry. En: Nestel B. Agricultural research for development: Potentials and challenges in Asia. The Hague. The Netherlands. 354 pp.

Mahecha L. 2003. Importancia de los sistemas silvopastoriles y principales limitantes para su implementación en la ganadería colombiana. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 16(1):11-18.

Maldonado M., F.; Jasso M., J.; Palma L., D. J.; Salgado G., S. y González H., V. A. 2006. Dinámica de materia orgánica, P y K en suelos de sistemas agroforestales 'cedro-plátano en Tabasco, México. *Fitotecnia Mexicana* 29 (3): 223-230

Maynard C. and Kalra. 1993. Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. En Carter (Ed.). *Soil sampling and methods of soil analysis*. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers.

McDowell R, S Sharpley, P Brookes, P Poulton (2001) Relationship between soil test phosphorus and phosphorus release to solution. *Soil Sci*. 166 (2): 137-149.

Mengel K.y E.A. Kirkby. 2001. *Principles of plant nutrition*. Kluwer academic publisher. The Netherlands. 849 pp.

Meza, E. y Geisser, D. 2006. Estabilidad de estructura en andisoles de uso forestal y cultivados. *Terra Latinoamericana* 24 (2): 163-170.

Miranda, F. 1947. Estudios sobre la vegetación de México –V. Rasgos de la vegetación en la Cuenca del Río de las Balsas. *Revista de la sociedad Mexicana de Historia Natural* 8: 95-113.

Moguel, P. y V. M. Toledo. 1996. El café en México, ecología, cultura indígena y sustentabilidad. *Ciencias* 43: 40-51.

Moguel, P. y Toledo, V. M. 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation Biology* 13 (1): 11-21.

Monroy, A. 2009. Impacto de sistemas agroforestales sobre el suelo y potencial de regeneración de la vegetación en Chiapas, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Pp 122.

Montagnini, F. 1992 Sistemas Agroforestales: Principios y Aplicaciones en los Trópicos. Organización para Estudios Tropicales (OTS) / Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) Turrialba, Costa Rica. 622 p.

Montagnini, F; Jordan, C. F. y Matta, R. M. 1999. Reciclaje y eficiencia de nutrientes en sistemas agroforestales. Revista Forestal Yvyrareta 9: 21–40.

Muñoz I. D. J., Mendoza C. A., López G. F., Soler A. A., Hernández M. M. M. 2000. Manual de análisis de suelo. Edafología. Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM, México.

Muschler, R. G. 2000. Árboles en cafetales. Turrialba, CR, Proyecto Agroforestal CATIE /GTZ. (Materiales de enseñanza No. 45). Pp. 13

Nair,P.K.R. 1982 Agroforestry defined. En: agroforestry systems in the tropics. Netherlands: Kluwer academy publishers. P 13-14.

Nair, P. K. R. 1984. Soil productivity aspect of Agroforestry. ICRAF, Nairobi, Kenya.

Nair P. K. R. 1989. Agroforestry defined. In: Agroforestry Systems in the Tropics. Dordrecht (eds). The Netherlands Academic. pp:13-18.

Nair P.K.R 1993. An introduction to agroforestry.. Kluwer Academic. Dordrecht, The Netherlands. 499 pp.

Nair, P. K. R. 1997. Agroforestería. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Pp. 543.

Norma Oficial Mexicana, 2002. Que Establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis. NOM-021-RECNAT-2000. 2a Ed. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 89 p. Diario Oficial, 31 de diciembre de 2002.

Ortega T. E. 1981. Química de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 417 pp.

Ortiz, B., Ortiz, C. 1990. Edafología. 7 ed. Chapingo, México, Universidad Autónoma de Chapingo. 394 p.

Osman K.T. 2013. Soils, principles, properties and management. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 271 pp.

Ospina Alfredo. 2004. Agroforestería, Definición y concepto en Agroforestería en Latinoamérica: Experiencias Locales. Movimiento agroecológico para América Latina y el Caribe. La Paz-Bolivia.

Pérez, J.R. 2004. Colecciones ex situ de la Universidad Autónoma Chapingo en Huatusco, Ver. UACh. México 40-84.

Perfecto, I. Rice, R. Greenberg, R. y Van der Voort, M. E. 1996. Shade Coffee: A disappearing Refuge for Biodiversity. Bioscience 46 (8): 598-608.

Perfecto, L., Vandermeer J., Mas, A., Soto Pinto, L. 2005. Biodiversity, yield, and shade coffee certification. Ecological Economics 54: 435 – 446.

Pezo D. y M. Ibrahim 2008. Sistemas silvopastoriles, Colección de módulos de enseñanza agroforestal, módulo de enseñanza No. 2. CATIE, Turrialba, Costa, Rica. 258 pp

Pohlan, J.; Soto, L. y Barrera, J. 2006. El cafetal del Futuro. Realidades y Visiones. El Colegio de la Frontera Sur. Chiapas, México. Pp. 373-380.

Romero-Alvarado, Y., Soto-Pinto, L., García-Barrios, L. y Barrera-Gaytán, F. 2002. Coffee yield and soil nutrients under the shade of Inga sp. vs. multiple species in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* 54 (3):215-224.

Roy R.N., A. Finck, G.J. Blair y H.L.S. Tandon. 2006. Plant nutrition for food security, a guide for integrated nutrient management. *FAO Fertilizer and plant nutrition bulletin*. No. 16. 349 pp

Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. limusa. México D. F., México. 432 p.

SAS, 2002. *The SAS System for Windows version 9.0 (version en Español)*. Copyright (C) By SAS Institute Inc., Cary, N. C., USA.

SEMARNAT, 2003. *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2002*.

Silva, A.; Ponce de León, J.; García, F. y Durán, A. 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. *Boletín de Investigación* N° 10. Facultad de Agronomía. Universidad de la República

Soil Science Society of America, 1996. *Glossary of Soil Science Terms*. Madison, WI, USA.

Soil Science Society of America (SSSA). 1984. *Glossary of Soil Science Terms*. SSSA. SSSA, EUA.

Somarriba E. 1998. ¿Qué es agroforestería? En: Jiménez F. y Vargas A. (Eds). *Apuntes de clase del curso corto: Sistemas Agroforestales*. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Serie Técnica. Manual Técnico. 32:1-14.

Soto-Pinto, L., I. Perfecto, J. Castillo-Hernández, J. Caballero-Nieto. 2000. Shade effect on coffee production at the northern tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80(1-2):61-69.

Soto-Pinto L., V. Villalvazo, G. Jimenez-Ferrer, N. Ramírez-Marcial, G. Montoya, F. Sinclair. 2007. The role of coffee knowlege in determining shade composition of multistrata coffee systems in Chiapas, Mexico. *Biodiversity and Conservation*. 16:419-436

Steel, R. y Torrie, J. 1998. *Bioestadística: Principios y procedimientos*. Mc Graw-Hill. México, México, D.F. Pp. 622

Thompson, L. y F. Troeh. 1980. *Los suelos y su fertilidad*. Editorial Reverté S.A. 647 p

Tiessen H. and Moir J. O. 1993. Total and organic carbon. In: *Soil sampling and methods of analysis*. Martin R. Carter Editor. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. pp. 187-199. Topp G. C. 1993. Soil water content. In: *soil sampling and methods of analysis*. Martin R. Carter Editor. Canadian Society of Soil Science. Lewis Publishers. Pp. 541-557.

Tittonell, P. y López R., S. 2007. La materia orgánica como indicador edáfico de sustentabilidad: ¿Cómo determinar umbrales críticos? En *Memoria: XVII Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo*. León, Guanajuato. México.

UACH 2005. *Acciones de Fomento productivo y mejoramiento de la calidad del café en México. Evaluación nacional externa*. Universidad Autónoma Chapingo

UNCCD. 1996. *United Nations Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa*.

USDA. 1999. *Soli taxonomy. A basic System of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Agriculture handbook No. 436. 870 pp.

Vázquez A. A. y Bautista N. 1993. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma de Chapingo. México.

Villaseñor, José Luis. 2010. El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: catálogo florístico-taxonómico. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad - Universidad Nacional Autónoma de México. 40 pp. México, D.F.

Young, A. 1989. Agroforestry for soil management. CAB International. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF). UK. Pp. 320.

Young A. 1990. Agroforestry for soil conservation. CAB International. Wallingford, United Kingdom. 276 pp.

Zhang, H., 1994. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. Soil Tillage Res. 31, 263 -275.

7. ANEXOS

Anexo 1. Análisis de varianza para todas las variables evaluadas de los sistemas estudiados

Variable dependiente: Densidad Aparente (DAP)

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	0.39752222	0.03613838	8.37	<0.0001
Error	24	0.10366667	0.00431944		
Total correcto	35	0.50118889			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	DAP Media	
	0.793158	6.850056	0.065722	0.959444	

Variable dependiente: Capacidad de Campo

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	911.050556	82.822778	5.45	0.0003
Error	24	364.696800	15.195700		
Total correcto	35	1275.747356			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	CC Media	
	0.714131	7.841990	3.898166	49.70889	

Variable dependiente: Punto de Marchitamiento Permanente

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	1212.298364	110.208942	14.04	<0.0001
Error	24	188.429933	7.851247		
Total correcto	35	1400.728297			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	PMP Media	
	0.865477	7.547439	2.802008	37.12528	

Variable dependiente: Potencial de Hidrógeno

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	5.32243056	0.48385732	11.37	<0.0001
Error	24	1.02146667	0.04256111		
Total correcto	35	6.34389722			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	pH Media	
	0.838984	3.654802	0.206303	5.644722	

Variable dependiente: Capacidad de Intercambio Catiónico

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	847.912222	77.082929	2.48	0.0303
Error	24	745.366667	31.056944		
Total correcto	35	1593.278889			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	CIC Media	
	0.532181	12.80957	5.572876	43.50556	

Variable dependiente: Materia Orgánica

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	882.5523639	80.2320331	17.92	<0.0001
Error	24	107.4772667	4.4782194		
Total correcto	35	990.0296306			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	MO Media	
	0.891440	23.67460	2.116180	8.938611	

Variable dependiente: Nitrógeno Total

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	2.20816389	0.20074217	17.82	<0.0001
Error	24	0.27040000	0.01126667		
Total correcto	35	2.47856389			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Ntot Media	
	0.890905	23.74894	0.106145	0.446944	

Variable dependiente: Nitrógeno Mineral

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	1763.256389	160.296035	4.44	0.0011
Error	24	867.286667	36.136944		
Total correcto	35	2630.543056			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Nmin Media	
	0.670301	25.43312	6.011401	23.63611	

Variable dependiente: Fosforo

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	4331.053831	393.732166	3.45	0.0054
Error	24	2740.824800	114.201033		
Total correcto	35	7071.878631			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	P Media	
	0.612433	99.44260	10.68649	10.74639	

Variable dependiente: Potasio

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	465448.8889	42313.5354	3.82	0.0029
Error	24	265920.0000	11080.0000		
Total correcto	35	731368.8889			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	K Media	
	0.636408	38.76245	105.2616	271.5556	

Variable dependiente: Calcio

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	21545608.75	1958691.70	38.37	<0.0001
Error	24	1225044.00	51043.50		
Total correcto	35	22770652.75			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Ca Media	
	0.946201	18.44185	225.9281	1225.083	

Variable dependiente: Magnesio

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	8520125.333	774556.848	43.32	<0.0001
Error	24	429116.667	17879.861		
Total correcto	35	8949242.000			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Mg Media	
	0.952050	21.95658	133.7156	609.0000	

Variable dependiente: Cobre

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	221.1830556	20.1075505	2.29	0.0432
Error	24	210.4043333	8.7668472		
Total correcto	35	431.5873889			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Cu Media	
	0.512487	103.1468	2.960886	2.870556	

Variable dependiente: Hierro

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	15103.65237	1373.05931	31.19	<0.0001
Error	24	1056.55793	44.02325		
Total correcto	35	16160.21030			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	Fe Media	
	0.934620	14.77345	6.635002	44.91167	

Variable dependiente: Zinc

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	183.7026222	16.7002384	13.71	<0.0001
Error	24	29.2383333	1.2182639		
Total correcto	35	212.9409556			
R-cuadrado		Coef Var	Raiz MSE	Zn Media	
0.862693		42.96604	1.103750	2.568889	

Variable dependiente: Manganeseo

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	22014.32286	2001.30208	8.32	<0.0001
Error	24	5769.56680	240.39862		
Total correcto	35	27783.88966			
R-cuadrado		Coef Var	Raiz MSE	Mn Media	
0.792341		40.92714	15.50479	37.88389	

Variable dependiente: Boro

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	11	11.11176389	1.01016035	2.27	0.0452
Error	24	10.68133333	0.44505556		
Total correcto	35	21.79309722			
R-cuadrado		Coef Var	Raiz MSE	B Media	
0.509875		28.75194	0.667125	2.320278	