



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO



DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN SUELOS

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

**EVALUACIÓN NUTRIMENTAL DEL SUELO Y LIMÓN MEXICANO CON
MANEJO CONVENCIONAL Y SILVOPASTORIL**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO
SOSTENIBLE**

PRESENTA:

FREDDY HUERTA ORTEGA



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO

NOVIEMBRE, 2014

**EVALUACIÓN NUTRIMENTAL DEL SUELO Y LIMÓN MEXICANO CON
MANEJO CONVENCIONAL Y SILVOPASTORIL, APATZINGÁN,
MICHOACÁN**

Tesis realizada por: **Freddy Huerta Ortega** bajo la supervisión del comité asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el
grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

Director:



Dr. Ranferi Maldonado Torres

Asesor:



Dra. Ma. Edna Álvarez Sánchez

Asesor:



Dra. Elizabeth Hernández Acosta

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, por darme la oportunidad de estudios de Maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por darme la beca durante la Maestría.

Al Dr. Ranferi Maldonado Torres, a la Dra. Ma. Edna Álvarez Sánchez, a la Dra. Elizabeth Hernández Acosta, por sus excelentes observaciones y conocimiento en la elaboración de la tesis, por brindarme su apoyo incondicional, no queda más que decirles, muchas gracias.

A la Maestra Langen Corlay por su orientación en el método para análisis micorrícico.

Al Dr. Miguel Uribe Gómez por sus comentarios sobre sistemas agroforestales, al Dr. David Cristóbal y la Dra. Ileana Ebergengy por brindarme su apoyo.

A los profesores que me impartieron diversos cursos.

A mis queridos padres Guillermina y Margarito, muchas gracias por confiar en mí y apoyarme en todo momento, con sus sabios consejos he logrado salir adelante.

A mis hermanos, Yeraldin, Yeymy, Sonia, Edmar, Gladisell, por compartir muchos momentos de dicha y felicidad.

A mi tía Emma y mis primos Pablo, Izamar, Teresa y Omar, muchas gracias.

A mis amigos Eugenia, Julio César y Edgar, a mis amigos de la Maestría gracias.

A la Dra. Martha Xóchitl y al Ing. Edgardo por apoyarme para realizar el experimento.

DATOS BIOGRÁFICOS

Freddy Huerta Ortega, nació el 18 de enero de 1988 en Minatitlán, Veracruz, realizó estudios de primaria y telesecundaria en la comunidad de La lagunilla, Tetela de Ocampo, Puebla, y el nivel medio superior en el Bachillerato General Juan Francisco Lucas. En el año 2006 ingresó a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Escuela de Ingeniería Agroforestal, Municipio de Tetela de Ocampo, Puebla. Realizó sus estudios de Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, en la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México (2013- 2014).

Participó como ponente en el 1^{er} Congreso Nacional de Agroforestería, Estrategias Frente al Cambio Climático y la Lucha contra el Hambre, celebrado en la Escuela de Ingeniería Agroforestal BUAP el 28 de febrero del 2014. También fue ponente en el XVIII Congreso Sociedad Mesoamericana para la Biología y la Conservación, con el tema: “Evaluación fisicoquímica de un sistema silvopastoril con limón mexicano, Apatzingán Michoacán”, en Copán, Ruinas, Honduras 13-17 de Octubre del 2014.

Laboró en la Secretaría del Medio Ambiente, en el programa Reverdece tu ciudad México, DF, como supervisor de poda y reforestación, en el año 2012.

EVALUACIÓN NUTRIMENTAL DEL SUELO Y LIMÓN MEXICANO CON MANEJO CONVENCIONAL Y SILVOPASTORIL

NUTRITIONAL EVALUATION OF SOIL AND MEXICAN LIME UNDER CONVENTIONAL AND SILVOPASTORAL MANAGEMENT

Posgrado en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo.
Tesis de Maestría en Ciencias. Freddy Huerta Ortega.
Director de tesis: Dr. Ranferi Maldonado Torres

RESUMEN

En el Valle de Apatzingán, Michoacán la producción convencional de limón mexicano es limitada por la baja fertilidad del suelo y el desbalance nutrimental de los árboles, lo que origina bajos rendimientos y deficiente calidad del fruto. Sin embargo, existen plantaciones de limón mexicano que se han manejado bajo sistemas de producción silvopastoril que han permitido rehabilitar el suelo, mejorar la producción y aumentar la rentabilidad del cultivo, mejorando la calidad de vida de los agricultores. Es por ello, que el objetivo de este estudio fue comparar la producción de limón mexicano, con manejo convencional y silvopastoril, a través del análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y el estado nutrimental de los árboles, para incrementar la producción sin deterioro del ambiente.

El estado nutrimental del suelo y propiedades físicas se determinaron de acuerdo a la NOM 021/2000 y Ankerman (1977), mientras que el estado nutrimental de los árboles mediante diagnóstico foliar a través de la estimación de los índices de balance de la Desviación Óptima Porcentual (DOP) y de Kenworthy. Sin embargo, los resultados obtenidos indicaron que a la fecha después de cinco años con manejo silvopastoril, no hubo cambios en las propiedades del suelo en ambos sistemas. Por lo que de manera general, el suelo de ambas parcelas, con manejo convencional y silvopastoril, presentaron textura arcillosa, $\text{pH} > 7.3$, bajo contenido de materia orgánica, muy bajo de N inorgánico, de medio a muy bajo en P disponible, muy altos en K, Ca, Mg y Cu, muy bajo en Fe y Mn; de medio a bajo en Zn y B. Por su parte, en la parcela con manejo convencional se encontró que el suelo tuvo mayor capacidad de campo y punto de marchitez permanente; en el silvopastoril mayor densidad aparente. En cuanto al estado nutrimental del limón mexicano, según el índice de balance Kenworthy, para el sistema convencional, el orden de requerimiento nutricional fue: $\text{P} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Mg} > \text{Ca} = \text{Cu} > \text{K} > \text{B} > \text{N}$, mientras que en el silvopastoril $\text{Zn} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{P} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{B} > \text{K} > \text{N}$, habiendo similitud de deficiencias y excesos.

La desviación óptima porcentual (DOP) indica que hay un exceso de N, K, B; deficiencia en P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu, con mayor limitación del primer macronutriente y, entre los micronutrientes más limitantes está el Fe seguido de Zn, Mn y Cu. Por su parte, el rendimiento por hectárea fue mayor en el convencional que en el silvopastoril, con una diferencia de producción de 48.2 %, sin embargo, el sistema silvopastoril presentó mayor calidad en diámetro ecuatorial, peso de fruto, volumen de jugo y grados brix respecto al manejo convencional. En el sistema silvopastoril se determinó menor temperatura (7.4°C) en la copa de los árboles, respecto al sistema convencional lo que reduce la presencia de clorosis férrica por foto oxidación de clorofilas y las unidades SPAD mostraron una diferencia de 14.12%. Además se determinó una mayor asociación micorrícica a niveles bajos de fósforo en el sistema silvopastoril.

Palabras clave: Sistemas de producción alimentaria, Diagnóstico nutrimental, propiedades del suelo.

ABSTRACT

In the Apatzingán Valley, Michoacán the conventional production of Mexican lemon is limited by low soil fertility and nutrient imbalance of the trees, which causes low yields and poor fruit quality. However, there are Mexican lemon plantations that have been handled under systems of production silvopastoral that have allowed rehabilitate soil, improve production and increase the crop profitability, improving the quality of life of farmers. This research intended to compare Mexican lemon production systems, under conventional and silvopastoral management, through analyzing the physical, chemical, and biological properties of the soil and the nutrient state of the trees, to increase production without environment deterioration.

The nutritional state and physical properties of soil were determined according to the NOM Ankerman and 021/2000 (1977), while, the nutrient state of the trees by foliar diagnosis through the estimation of the indices of balance sheet of the optimum Percentage Deviation (DOP) and Kenworthy. However, the results obtained indicated that at date, after five years with silvopastoral management, there were no changes in soil properties in both systems. So, in a general way, the soil of both plots, with conventional management and silvopastoral presented clay texture, $\text{pH} > 7.3$, low organic matter content, very low inorganic N, medium to very low in available P, very high in K, Ca, Mg and Cu, very low in Fe and Mn; of medium to low Zn and B. For its part, in the plot with conventional management it was found that the soil had a greater field capacity and permanent wilting point; in the silvopastoral greater bulk density. As regards the Mexican lemon nutrient state, according to the index of Kenworthy balance, for the conventional system, the order of nutritional requirement was: $\text{P} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Mg} > \text{Ca} = \text{Cu} > \text{K} > \text{B} > \text{N}$, whereas in the silvopastoral $\text{Zn} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{P} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{B} > \text{K} > \text{N}$, having similarity of deficiencies and excesses.

The percentage optimal deviation (DOP) indicates that there is an excess of N, K, B; deficiency in P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, and Cu, with greater restriction of first macronutrient, and between micronutrients the more limiting is the Fe followed by Zn, Mn and Cu. For its part, the yield per hectare was higher in the conventional than in the silvopastoral, with a production difference of 48.2 %, however, silvopastoral systems presented a higher quality in equatorial diameter, fruit weight, volume of juice and Brix degrees respect to conventional management. In the silvopastoral system was determined lower temperature (7.4°C) in the canopy, respect to the conventional system, which reduces the presence of iron chlorosis by photo oxidation of chlorophylls and SPAD units showed a difference of 14.12%. In addition is determined a greater mycorrhizal association at low levels of phosphorus in the silvopastoral system.

Key words: Food production systems, nutrient diagnosis, soil properties.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	12
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	15
2.1	Desarrollo de la citricultura.....	15
2.2	Generalidades de <i>Citrus aurantifolia</i>	17
2.2.1	Morfología.....	18
2.3	Importancia de la Agroforestería.....	20
2.3.1	Ventajas y desventajas de los sistemas agroforestales	23
2.4	Sistemas silvopastoriles.....	24
2.4.1	Fertilidad del suelo con sistemas silvopastoriles.....	26
2.5	Micorrizas.....	32
2.6	Alternativa con limón en Apatzingán Michoacán.....	37
2.7	Análisis de suelo en el diagnóstico nutrimental	40
2.8	Análisis de tejido vegetal	41
2.8.1	Índice de balance Kenworthy	43
2.8.2	Desviación Óptima Porcentual.....	46
III.	OBJETIVOS	48
3.1	Objetivo general	48
3.2	Objetivos específicos.....	48
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS	49

4.1	Ubicación del sitio.....	49
4.2	Condiciones del experimento	49
4.3	Análisis de suelo.....	50
4.3.1	Análisis físico del suelo.....	50
4.3.2	Análisis químico del suelo	51
4.4	Muestreo de tejido vegetal y análisis	51
4.4.1	Diagnostico nutrimental foliar	51
4.4.2	Análisis de hierro activo.....	53
4.5	Frutos de limón mexicano	54
4.5.1	Análisis de nutrientes en los frutos	54
4.5.2	Análisis de las principales variables en los frutos.....	54
4.5.3	Medición del rendimiento	54
4.6	Propuesta de fertilización por sistema de producción.....	55
4.7	Análisis de temperatura foliar externa	55
4.8	Análisis de unidades SPAD.....	56
4.9	Porcentaje de colonización micorrícica.....	56
4.9.1	Determinación del porcentaje de colonización micorrícica en raíces	57
4.9.2	Análisis estadístico de las principales variables.....	58
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
5.1	Análisis físico del suelo.....	59
5.2	Evaluación de la fertilidad del suelo, a través de análisis químico	63

5.3	Diagnóstico del estado nutrimental de limón mexicano	71
5.3.1	Índice de balance Kenworthy	71
5.3.2	Desviación Óptima Porcentual (DOP)	83
5.4	Frutos de limón mexicano	91
5.4.1	Análisis de nutrientes en los frutos	91
5.4.2	Análisis de las principales variables en los frutos.....	93
5.5	Rendimiento por hectárea de limón mexicano	96
5.6	Propuestas de fertilización	99
5.6.1	Fertilización sistema convencional	99
5.6.2	Fertilización sistema silvopastoril.....	100
5.7	Temperatura foliar externa	101
5.8	Unidades SPAD.....	105
5.9	Porcentaje de colonización micorrícica.....	109
VI.	CONCLUSIÓN.....	119
VII.	LITERATURA CITADA	121

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Tamaño del fruto de limón mexicano.	20
Cuadro 2. Contenidos de N, P y C en un sistema silvopastoril (SSP) de pasto estrella + <i>leucaena</i> + algarrobo y en monocultivo de pasto estrella.	28
Cuadro 3. Estándares Kenworthy establecidos para limón mexicano, que se cultiva en el Valle de Apatzingán, Michoacán, México.	45
Cuadro 4. Propiedades físicas del suelo con limón mexicano.	59
Cuadro 5. Análisis químico del suelo en sistemas de limón mexicano.	64
Cuadro 6. Balance nutrimental foliar de <i>Citrus aurantifolia</i> , mediante índice Kenworthy	72
Cuadro 7. Desviación óptima porcentual del análisis foliar de limón mexicano en el sistema convencional.	84
Cuadro 8. Desviación óptima porcentual del análisis foliar de limón mexicano en el sistema silvopastoril.	90
Cuadro 9. Análisis de nutrientes en el fruto de limón.	91
Cuadro 10. Variables medidas en fruto de limón.	93
Cuadro 11. Medias ^z de rendimiento por árbol.	96
Cuadro 12. Medias ^z de temperatura foliar externa.	102
Cuadro 13. Medias ^z de unidades SPAD en hojas de limón mexicano.	106
Cuadro 14. Frecuencias de clase correspondientes a unidades SPAD en hojas de	

limón mexicano, sistema convencional.	108
Cuadro 15. Frecuencias de clase correspondientes a unidades Spad en hojas de	
limón mexicano, sistema silvopastoril.	109
Cuadro 16. Determinación del porcentaje micorrícico.	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curvas de retención de humedad, sistema convencional y silvopastoril.	61
Figura 2. Muestreo de suelo en el sistema silvopastoril.	71
Figura 3. Muestreo foliar, quinta hoja fotosintéticamente activa.	71
Figura 4. Clorosis férrica foliar en limón mexicano del sistema convencional.	75
Figura 5. Sistema silvopastoril con limón mexicano, leucaena y pasto tanzania.	79
Figura 6. Bovinos pastoreando en el sistema silvopastoril limón-leucaena-tanzania.	81
Figura 7. Orden de déficit y exceso nutrimental del sistema convencional.	85
Figura 8. Limón mexicano desarrollado en el sistema convencional.	85
Figura 9. Orden de déficit y exceso nutrimental del sistema silvopastoril.	91
Figura 10. Medición de la temperatura foliar externa en los sistemas convencional y silvopastoril.	105
Figura 11. Medición del color las hojas (unidades SPAD).	107
Figura 12. Extracción de raíces secundarias en árboles de limón mexicano.	114
Figura 13. Observación de estructuras micorrícicas.	115
Figura 14. Vesícula observada a 100x en raíces de limón mexicano, Apatzingán, Michoacán.	117
Figura 15. Hifa observada a 40x en raíces de limón mexicano, Apatzingán.	118

I. INTRODUCCIÓN

México se ubica como el quinto productor de cítricos en el mundo, con una extensión de 520 mil hectáreas establecidas en 23 estados del país, en los que se producen, 6.7 millones de toneladas anuales aproximadamente, con un valor superior a los 8050 millones de pesos, que lo coloca en el segundo lugar en producción de limón mexicano, supera el millón 300 mil toneladas con un valor cercano a los 3 mil millones de pesos (SAGARPA, 2009).

Las principales regiones citrícolas se localizan en el noreste del país, costas del Golfo, Península de Yucatán y en la vertiente del Pacífico en la planicie costera del noroeste (Sonora) y en las costas de Jalisco, Colima, Guerrero, Oaxaca y Michoacán; para este último estado, se destaca el Valle de Apatzingán Michoacán (SAGARPA, 2012).

Esta agroindustria es generadora de una gran cantidad de empleos en diversas actividades ya sea en el campo, vivero, empacadoras, industria, transporte y la comercialización de fruta o subproductos.

A pesar de la experiencia en la producción de limón mexicano en el Valle de Apatzingán, en los sistemas se reportan algunos problemas como: manejo deficiente del riego, alta gomosis, enfermedades virales, inadecuado control de malezas y aspectos relacionados con la génesis suelo (Chávez, 1996), como presencia de carbonatos de calcio libres y el pH alcalino; factores que inciden negativamente en la disponibilidad, acceso, absorción, transporte y asimilación de nitrógeno inorgánico, fósforo, hierro, manganeso, zinc y cobre para los limoneros y en consecuencia en la producción (Maldonado *et al.*, 2001; Sumner, 2003).

El manejo convencional de limón mexicano en el Valle de Apatzingán Michoacán ha originado una disminución en la fertilidad del suelo, con repercusión a la baja en el rendimiento del cultivo y la calidad de la fruta (Maldonado *et al.*, 2001). Ante tal situación se ha propuesto el manejo silvopastoril de las parcelas, con el propósito de rehabilitar el suelo y mejorar el estado nutrimental de los árboles, al incrementar el aporte de materia orgánica e infiltración de agua, amortiguar la radiación solar sobre estos, y aprovechar nutrientes mediante el incremento de la actividad microbológica benéfica del suelo como, micorrizas etc. En este sistema se combinan árboles de limón, leucaena, pasto tanzania y pastoreo de bovinos con doble propósito (leche y carne) manejados con cerco eléctrico y regulando la carga animal al 60%, 2.4 UA/ha, para no causar daños y producir a bajos costos sin fertilización química (Contexto ganadero, 2013).

Dado que el cultivo de limón es de importancia económica en México, la información como sistema de producción convencional es limitada y menos estudiada como sistema silvopastoril, ya que al aumentar el número de componentes vegetales y animales, las interacciones de éstos se complica en su análisis. La ventaja de los sistemas silvopastoriles radica en la diversidad de especies, fijación de nitrógeno cuando se asocia con leguminosas, y promoción de las micorrizas. Esto mejora las condiciones del suelo, con ello se muestran ventajas frente a la producción convencional, pero falta diagnosticar la fertilidad desde el punto de vista físico, químico y biológico en este tipo de sistema agroforestal. Sin embargo Mazorra *et al.* (2003), mencionan que los animales contribuyen a la compactación del suelo, pero el resultado final favorece la fertilidad del mismo.

De acuerdo con Maldonado *et al.* (2001) los suelos del valle de Apatzingán con huertos de limón, presentan contenidos de carbonato de calcio > al 1%, pH alcalino (> a 7.0), pobres en materia orgánica (1.4%), un contenido de medio a bajo en nitrógeno inorgánico y fósforo, altos en potasio, calcio, magnesio y bajos en hierro, manganeso zinc y cobre, condiciones que afectan a la fertilidad y nutrición del limón mexicano, reflejado en las deficiencias nutrimentales de la planta.

Para establecer racionalmente las necesidades nutrimentales en los huertos de cítricos y decidir acerca de la fertilización que debe ser aplicada, es necesario realizar el análisis del suelo y de la planta para conocer el estado nutrimental del sistema. Esta información es importante para la toma de decisiones, que permitan para intervenir y corregir algún problema nutrimental en el suelo, y en arboles limón mexicano.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue comparar la producción de limón mexicano, con manejo convencional y silvopastoril, a través del análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y el estado nutrimental de los árboles, para incrementar la producción sin deterioro del ambiente.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Desarrollo de la citricultura

Los cítricos son árboles de hoja perenne, poseen una marcada competencia entre el crecimiento vegetativo y productivo, un sistema radicular relativamente superficial y un gran desarrollo del área foliar. Se adaptan a diversas situaciones ecológicas comprendidas entre el Ecuador y latitudes ligeramente superiores a los 40° norte y sur. Estos árboles necesitan suelos permeables, humedad tanto en el suelo como en la atmósfera y unas temperaturas cálidas, alcanzan su máximo desarrollo en las áreas subtropicales (30-40° latitud N y S). En estas áreas la producción es estacional y la calidad del fruto para el consumo en fresco es excelente, ya que tiene una coloración anaranjada o amarilla muy atractiva y aunque la concentración de jugo no es muy alto éste tiene una relación de azúcares y ácidos muy agradable al paladar. En las regiones tropicales desde el Ecuador hasta 24° latitud N y S, la calidad del fruto es muy variable y depende de los microclimas y la altitud. La producción es casi continua a lo largo del año y generalmente los frutos no alcanzan su color característico. Estos son jugosos, muy dulces, poco ácidos y se destinan principalmente al consumo local (Agustí, 2003).

México se ubica como el quinto productor mundial de cítricos, siendo esta actividad de gran importancia en la fruticultura nacional. La producción de cítricos, se distribuye en 23 estados donde predomina el clima tropical y subtropical, en los que se concentra el 90.26% de la superficie establecida y el 91.33% de la producción nacional. El cultivo de cítricos representa una fuente importante de ingresos en las zonas rurales, y se estima que cerca de 67,000 familias dependen de esta actividad, reflejada en las 542,350 hectáreas cultivadas (SAGARPA, 2009).

Los cítricos de mayor importancia en el país son la naranja, el limón (mexicano, italiano, y persa), mandarinas, tangerinas y toronjas, pero estos enfrentan una rentabilidad reducida (<1), ya que no se han incrementado los rendimientos.

En la producción de limón mexicano a nivel mundial, México ocupa el segundo lugar, después de la india y seguido por Argentina, China, Brasil y Estados Unidos.

En cuanto al comercio internacional de limón mexicano durante el 2010, nuestro país ocupó el primer lugar en cuanto a exportación del cítrico, con un poco más de 40,408.00 toneladas, con un valor de exportación de \$ 17,949,463.82 (USD), los principales destinos de exportación del limón mexicano son los Estados Unidos y Japón, con prácticamente el 99.90% de las exportaciones mexicanas (Faostat, 2012).

El Limón Mexicano se cultiva principalmente en los estados de Michoacán, Colima, Oaxaca, Guerrero y Jalisco, ocupa una superficie de 153,442.62 hectáreas, con una producción promedio anual de 1.89 millones de toneladas. (SAGARPA, 2012). En la producción anual exportable generalmente han participado tres estados con volúmenes marginales (Veracruz, Michoacán y Colima), y en la cadena productiva de limón participan más de 25,000 familias.

Es importante destacar que la producción de limón en México está prácticamente dividida por zona geográfica, ya que el Limón persa se produce principalmente en los estados costeros del Golfo de México, mientras que el limón Mexicano (o limón Agrio) se produce en los estados del litoral del Pacífico (SAGARPA, 2012).

La mayor parte de la producción (90%) ocurre en los meses de junio a septiembre, época que coincide con los precios más bajos en los mercados nacional e internacional (ASERCA, 2002).

El limón mexicano con espinas se cultiva bajo un sistema de producción convencional, con innovaciones tecnológicas para el control de plagas y enfermedades, fertilización química, periodos de riegos, podas, portainjertos y cierto manejo del periodo de producción durante el invierno, utilizando agroquímicos y algunas compostas.

Los portainjertos más utilizados para *Citrus aurantifolia*, en suelos profundos con diferente textura son Macrofila y Volkameriana (Medina-Urrutia *et al.*, 2001). En Perú, donde los suelos son arenosos y profundos existe mayor preferencia por limón Rugoso y Volkameriana.

Medina-Urrutia *et al.* (2009) encontraron en un suelo superficial que el portainjerto Macrofila mostró mayor crecimiento promedio de los dos cultivares seguido del Taiwanica. La producción de limón fue similar con los portainjertos Macrofila, Rugoso, Taiwanica y naranjo Agrio, con más de 100 kg de fruta /árbol⁻¹/año⁻¹.

2.2 Generalidades de *Citrus aurantifolia*

El limón mexicano, limón verde o lima agria, cuya denominación científica es la de *Citrus aurantifolia*, es originario de Asia (posiblemente del Archipiélago de India), desde donde fue transportado a Egipto, Europa y posteriormente a América (Dussel, 2002).

Se ubica dentro de las limas ácidas, junto con el limón Persa (*Citrus Latifolia* T.) y el limón verdadero (*Citrus limón*) (Dussel, 2002).

Nombre común: Lima, limón agrio, limón criollo, limón mexicano.

Nombre científico: *Citrus aurantifolia*

Familia: Rutácea

Tribu: Citreas

Género: *Citrus*

Especie: Aurantifolia

Subfamilia: Aurantioideae

Subtribu: Citrinas

Subgénero: Eucitrus

Se cultivan bien en regiones con climas donde las temperaturas oscilan desde los 17 °C hasta los 38.6 °C, pero la temperatura óptima está entre los 20 °C y los 30 °C.

Donde la humedad relativa es alta (80–90%) se tiene la ventaja que los cítricos presentan un mayor crecimiento, porque se disminuye la tasa de transpiración y el consumo de agua es menor comparado con los cítricos de las zonas de baja humedad relativa. Sin embargo, la presencia de enfermedades fungosas en los árboles y en los frutos es mayor en zonas con alta humedad relativa.

Por su parte los cítricos desarrollan mejor en zonas con precipitaciones entre 1200 y 2500 mm anuales y crecen desde el nivel del mar hasta los 2200 msnm.

Los suelos más apropiados para el desarrollo de los cítricos deben ser fértiles, de textura migajón arcillosa y migajón arenosa, profundos mayores a 40 cm y, con buen drenaje.

Los terrenos con pH neutro son los más recomendables, aunque se adaptan bien a suelos alcalinos, con pH de hasta 8.5. En cuanto a radiación los cítricos requieren de 1,600 a 2,000 horas de luz solar por año para realizar una buena fotosíntesis y promover buen color y brillo en los frutos.

2.2.1 Morfología

Las raíces son órganos que presentan gran actividad fisiológica, tienen una raíz principal pivotante, y raíces secundarias cuyo mayor porcentaje se encuentra en los primeros centímetros del suelo. El tronco es corto regularmente delgado, torcido y con muchas ramas provistas, con espinas auxiliares de 1 cm en promedio que funcionan como

defensa a depredadores naturales, las ramas están encorvadas hacia el suelo, densamente armadas se forman a partir de yemas que brotan en las axilas de las hojas, las ramas nuevas tienen una orientación vertical pero al crecer y sostener frutos se doblan gradualmente.

Posee hojas perennes de agradable aroma, que van de verde oscuro en hojas maduras a verde pálido en jóvenes, cuya densidad llega a tomar formas elípticas u ovaladas, de 2.5 a 9 cm. de longitud y 1.5 a 5.5 cm de ancho, tienen base redondeada y ápice ligeramente recortado, y los pecíolos notablemente alados.

Sus flores son blancas amarillentas con bordes morados, aparecen aisladas o agrupadas en racimos y casi siempre se forman en las ramas más jóvenes, la floración es muy abundante, normalmente pueden producir hasta diez mil flores, y luego se produce una pérdida importante de ellas, solamente entre el 5% y 10 % llegan a ser frutos.

Los frutos del limón (*Citrus aurantifolia* S.) son de forma redonda-oval de colores que van del verde oscuro brillante al amarillo, encierra en un número variable de celdas llamadas gajos (vesículas llenas de zumo) con 9 a 12 segmentos y un eje pequeño sólido. Todos los frutos de los cítricos presentan la mismas estructuras anatómicas: flavedo, albedo y carpelos, aunque los elementos que componen estas estructuras varían de acuerdo a la especie y la variedad (Loussert, 1992). El flavedo (cáscara) está constituido de tejidos morfológicamente diferentes. El tejido más externo es la epidermis, una capa de células poligonales isodiamétricas que cubren la superficie entera del fruto (Ting y Attaway, 1971).

Los limones deben presentar un grado de madurez fisiológica, el cual se determina por el contenido de jugo, que no debe ser menor de 30% en base a su peso, en número o peso

de frutas que no satisfagan el requisito, y se clasifican de acuerdo a lo que se muestra en el Cuadro 1 (PC-024-2005).

Cuadro 1. Tamaño del fruto de limón mexicano.

Código	Intervalo (mm)	Unidades de producto por kilogramo
1*		
2	32.1-35.0	41-36
3	35.1-37.0	35-30
4	37.1-39.0	29-24
5	39.1 >	< de 24

* No se admiten calibres inferiores a 31 mm, por lo que se suprime el código del calibre número 1 (Unión de empacadores).

2.3 Importancia de la Agroforestería

La explosión demográfica ha originado una alta presión sobre el suelo en muchos lugares del trópico, provocando la degradación del mismo, disminuyendo el rendimiento de los cultivos y a la invasión de hierbas difíciles de controlar. Por lo que, una de las alternativas para frenar este proceso es la explotación de la tierra a través de sistemas agroforestales o agroforestería (López, 2007).

Muchos sistemas agrícolas tradicionales, y ganaderos, tienen árboles intercalados con cultivos o son manejados en una forma zonal alternando árboles y cultivos y/o pastos.

Aun con la modernización de la agricultura, son sistemas agroforestales de la región, donde los paisajes agrícolas todavía contienen un alto número de árboles que cumplen

con muchos propósitos, como la producción de madera, leña, forraje, frutas, medicinas, etc., además de servicios de sombra para cultivos y/o animales, protección como en el caso de cortinas rompevientos, entre otros. También se ha observado que los árboles aumentan la diversidad biológica del agroecosistema creando en sus ramas, en sus raíces y en la hojarasca, hogares para otros organismos (Beer *et al.*, 2004).

El International Council for Research in Agroforestry (1983), define agroforestería como un: sistema sostenido de manejo de la tierra que aumenta su rendimiento total, combina la producción de cultivos con especies forestales y/o animales, en forma simultánea o secuencial sobre la misma superficie de terreno, y aplica prácticas de manejo que son compatibles con las prácticas culturales de la población local.

Se fundamenta en principios y formas de cultivar la tierra basado en mecanismos variables y flexibles en concordancia con objetivos y planificaciones propuestos, permitiendo al agricultor diversificar la producción en sus fincas o terrenos, obteniendo en forma asociativa madera, leña, frutos, plantas medicinales, forrajes y otros productos agrícolas (Ramírez, 2005).

Esta técnica combina la agronomía, la silvicultura y la zootecnia para lograr un adecuado manejo del conjunto y las interdependencias entre cada uno de sus elementos (Mazorra *et al.*, 2003). Es considerada como una de las estrategias más importantes para aproximarse a sistemas agropecuarios sostenibles, ofreciendo ventajas como el incremento de la cobertura vegetal, protección y mejoramiento de la calidad de suelos, aumento de la diversidad biológica, recuperación y conservación de fuentes de agua, sumidero de CO₂, producción de leña y fuente de alimento para animales rumiantes y monogástricos, e incluso para el hombre; catalogados como sistemas socialmente deseables y económicamente viables (CIPAV, 1999; FAO, 2006).

No obstante, aunque la frase “rendimiento sostenido” se usa frecuentemente como una cualidad obligada de la agroforestería, no existe un planteamiento claro, en el concepto como tal, acerca del cuidado de la naturaleza, de la conservación del entorno a largo y mediano plazo, aspecto muy importante en los momentos actuales cuando el mundo se debate ante la perspectiva de la desaparición de las fuentes de energía no renovables, así como de numerosas especies de animales y plantas (Iglesias, 2011).

Los atributos que caracterizan a la mayoría de los sistemas agroforestales son la productividad, sostenibilidad y adaptabilidad, (Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Por otra parte, la agroforestería ha demostrado tener un potencial significativo para lograr una producción sostenible, tomando como base las características del sitio donde se desee establecer y donde la producción y los beneficios de la conservación son los objetivos a cumplir.

Uno de los desafíos que tienen los sistemas de producción en la actualidad, es integrar el uso y la conservación de los recursos naturales con la necesidad de alimentación de la población, lo que puede lograrse con el rescate del conocimiento de los productores y la investigación sobre el uso y manejo de recursos naturales.

La agroforestería con el uso de árboles y arbustos forrajeros ofrece la posibilidad de desarrollar sistemas de producción ganadera vigorosos (Jiménez *et al.*, 2002).

La existencia de dos o más elementos cercanos unos de otros, producen interacciones que pueden llevar a la competencia de los recursos, aunque esta no tiene porqué presuponer que uno de ellos deberá reducir su producción o productividad con respecto al otro. En el caso de un elemento animal y otro vegetal, los efectos de competencia derivan hacia la compartición de la biomasa productiva, en el caso de que el componente animal sea herbívoro, mientras que en el caso de dos componentes vegetales, la

competencia podría ser por nutrientes, luz, agua, espacio etc. Al respecto hay tres efectos interactivos entre los componentes del sistema (Muschler, 1994).

El primero es el complementario, donde un incremento de la producción por parte de uno de los componentes, lleva parejo el aumento de la producción del otro. El segundo es suplementario, donde la producción de un componente se mantiene estable, mientras que la del otro aumenta, es decir la producción de uno no afecta al otro. Finalmente, el competitivo, el aumento en la producción de un componente provoca una reducción en la producción del otro.

Las interacciones entre los componentes deben ser consideradas con base a su resultado neto, como positivas cuando aumentan la producción o negativas cuando disminuyen la producción.

2.3.1 Ventajas y desventajas de los sistemas agroforestales

Ventajas

- Mejor utilización del espacio vertical y mayor aprovechamiento de la radiación solar entre los diferentes estratos vegetales del sistema.
- Microclima más moderado (atenuación de temperaturas extremas, sombra, menor evapotranspiración y viento).
- Protección contra la erosión por viento y agua, al reducir el impacto erosivo de las gotas de lluvia y escorrentía superficial.
- Aumenta la fijación de nitrógeno atmosférico mediante los árboles y leguminosas.
- Mantiene la estructura y fertilidad del suelo con aportes de materia orgánica, mayor actividad biológica, reducción de la acidez y reciclaje de nutrientes extraídos de horizontes profundos del suelo.
- Rehabilita suelos degradados.

- Se obtienen productos adicionales: madera, frutos, leñas, hojarasca, forraje, etc.
- Provee de un hábitat para incrementar la biodiversidad, reducir la contaminación del suelo y mantos de agua.
- Contribuye a reducir la diseminación y daño por plagas y enfermedades.

Desventajas

- Puede disminuir la producción de cultivo de interés cuando se utilizan demasiados árboles y/o especies incompatibles.
- Pérdida de nutrientes cuando los productos forestales, agrícolas o animales son aprovechados y exportados fuera de la parcela.
- Reducción de la cantidad de agua de lluvia que llega al suelo por interceptación de ésta por los árboles.
- Daños mecánicos eventuales a los cultivos asociados cuando se cosechan o se podan los árboles, o por caída de gotas de lluvia desde árboles altos.
- Los árboles pueden obstaculizar la cosecha mecánica de los cultivos.
- El microambiente puede favorecer algunas plagas y enfermedades.

2.4 Sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles son una modalidad de los sistemas agroforestales, donde desarrollan, conjuntamente, árboles y pasturas, que son explotados para la producción animal y cuyo objetivo es incrementar la productividad en forma sostenible y obtener, además, otros beneficios (Alonso *et al.*, 2007).

La actividad silvopastoril está dirigida a optimizar la producción agropecuaria, generando la oportunidad de incrementar la producción de biomasa con mayor calidad, permite la mejora y conservación de suelos degradados y, hace que los sistemas sean

productivos y más biodiversos. Esto conlleva a mejores posibilidades para ser sostenibles (Ibrahim *et al.*, 2007).

A pesar de todas estas ventajas, aún falta información y documentación que permita aumentar los conocimientos acerca de las interacciones entre los componentes (Machecha *et al.*, 2002).

Los árboles pueden promover la disponibilidad de los nutrientes de las capas más profundas del suelo para su aprovechamiento por los pastos y, producir el efecto del reciclaje. Estos efectos son más pronunciados cuando los árboles tienen sistemas radiculares profundos y poseen la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico, en el caso de las especies leguminosas (Rey-Obando, 2006).

En un estudio donde se evaluó el reciclaje de nutrientes en sistemas silvopastoriles, Crespo *et al.*, (1998), obtuvieron un balance positivo para el nitrógeno y el fósforo que aumentaron 22 kg/ha y 1.0 kg/ha respectivamente, el potasio permaneció sin modificación, mientras en el área de pasto natural sin *leucaena* se obtuvo un balance negativo de -15 kg/ha de nitrógeno, -6 kg/ha de fósforo y -17.5 kg/ha de K, demostrando así la contribución positiva de la *leucaena* en el balance del nitrógeno en el sistema. Este efecto favorable obedece a la fijación biológica del nitrógeno atmosférico por medio de bacterias como *Rhizobium*, así como a la descomposición de la hojarasca.

En los últimos años se ha incrementado la preocupación por el alarmante deterioro de los pastizales en extensas regiones de clima tropical, por la inapropiada regionalización de los pastos, los ineficientes métodos de manejo y de control de malezas y las sequías prolongadas. Unido a todo lo anterior, la pérdida gradual de la fertilidad del suelo, en especial la marcada disminución del contenido de nitrógeno fácilmente asimilable constituye un factor de considerables dimensiones (Crespo, 2008). En tal sentido, la

integración de las leguminosas arbóreas con las gramíneas puede ser una alternativa adecuada, pues además de facilitar el incremento de la cantidad y la calidad de la biomasa comestible para la producción animal por unidad de área puede contribuir a mejorar la fertilidad del suelo, la conservación y rehabilitación del medio ambiente (Mazorra *et al.*, 2003).

A pesar de las entradas de nitrógeno al sistema por medio de la lluvia, la fijación biológica o de algún abono orgánico, se necesitará de aplicaciones estratégicas de fertilizante nitrogenado, pues existen pérdidas de este mineral en las excreciones de los animales, por volatilización y escorrentía. Crespo *et al.* (2005), consideran que los organismos invertebrados (lombrices y escarabajos), son de mayor importancia para mejorar la fertilidad de los suelos tropicales, tienen una influencia en la estructura del suelo, pues actúan en la inmovilización y humificación de los nutrientes, procesos que pueden realizarse en horas, días o incluso años, estabilizando la materia orgánica del suelo.

2.4.1 Fertilidad del suelo con sistemas silvopastoriles

El reciclado de nutrimentos en los sistemas silvopastoriles ocurre a través de la senescencia de biomasa aérea y la muerte de raíces, tanto de las leñosas como del estrato herbáceo. Esto se da a través del material podado que es dejado en el campo, y que por medio de las excretas que los animales se depositan durante el pastoreo.

En estos sistemas de baja productividad y en aquellos sometidos a defoliación directa por los animales, la extracción de nutrimentos es generalmente baja, por lo que el reciclaje es un mecanismo eficaz para prevenir una pérdida rápida del potencial productivo del sistema; mientras que donde los niveles de extracción son altos, como es el caso de los bancos forrajeros manejados bajo esquemas de corte y acarreo, la única

forma de sostener la productividad es mediante la aplicación de altos niveles de fertilizantes (Libreros *et al.*, 1994).

Reciclaje de nutrientes: el manejo de gramíneas acompañado con árboles y/o arbustos, permite que una fracción de nutrientes extraídos de la solución edáfica sea retornada a ella mediante la deposición en la superficie del suelo, con el follaje y residuos de pastoreo o podas. Esta mayor deposición de materia orgánica, contribuye a modificar las características físicas del suelo como su estructura (Sadeghian *et al.*, 1998). La mayor presencia de materia orgánica en el suelo y el microclima (humedad y temperatura) creado por la presencia de árboles, favorece la actividad biológica de la micro y macro fauna, lo cual resulta en una mayor mineralización y disponibilidad de nitrógeno en el suelo (Belsky *et al.*, 1993). Además, la materia orgánica que es incorporada paulatinamente por la acción de la endofauna, contribuye a mejorar la estabilidad del suelo y la capacidad de infiltración de agua.

Las leguminosas se asocian con bacterias del género *Rhizobium* para captar nitrógeno atmosférico, haciéndolo disponible para las gramíneas en el suelo. En promedio se estima una fijación de 200 kg N/ha/año en el trópico (Giraldo, 2000).

Para el caso de *leucaena*, descrita como una excelente especie forrajera que fija nitrógeno en cantidades que van de 100-600 kg de N/ha/año (Batis *et al.*, 1999), se indica que es posible reemplazar la fertilización nitrogenada de gramíneas con demandas de 0 a 200 kg N/ha, con las leguminosas asociadas (Camacaro *et al.*, 2004). En el caso específico de *leucaena*, se sabe que nodula espontáneamente con el *Rhizobium* propio del sitio, determinándose que posee una capacidad anual de fijación de nitrógeno de 600 a 1000 kg/ha (Halliday y Somaseragan, 1983).

El Cuadro 2. Muestra un estudio realizado con sistemas silvopastoriles de *Prosopis juliflora*, *Leucaena leucocephala* y *Cynodon plectostachyus*, donde se encontró que la presencia de árboles leguminosos en los potreros, permitió incrementar la concentración de nutrimentos del suelo, entre los que destacan carbono, nitrógeno, y fósforo, a profundidades desde 10-30 cm, en comparación a los potreros que tenían sembrada la gramínea en monocultivo (Ramirez, 1998).

Cuadro 2. Contenidos de N, P y C en un sistema silvopastoril (SSP) de pasto estrella + *leucaena* + algarrobo y en monocultivo de pasto estrella.

Tratamiento	----- Profundidad del suelo -----								
	---- 0-10 cm----			---- 10-20 cm ----			---- 20-30 cm ----		
	N	P	C	N	P	C	N	P	C
	%	mg kg ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	%	%	mg kg ⁻¹	%
Silvopastoril	0.14	29	1.68	0.11	25	1.40	0.22	15	0.92
Monocultivo	0.08	16	1.0	0.06	16	0.70	0.12	15	1.48

Para estudiar la influencia del tiempo de utilización de un silvopastoreo leucaena–guinea en las propiedades químicas del suelo, se realizó un diagnóstico inicial en áreas con la asociación y se identificaron 4 años de siembra: 1995, 1996, 1997 y 1998, que correspondieron con 6, 5, 4 y 3 años de utilización, respectivamente.

En todos los años evaluados se encontró de forma general, evolución favorable de la materia orgánica con valores superiores a 4 % al finalizar el estudio, sin incrementos significativos en las dos áreas con menor tiempo de explotación (Alonso *et al.*, 2007).

La concentración de P y Ca en cada uno de los años de siembra fueron altos y mostraron disminución significativa (321.6 vs 165.4 y 238.7 vs 114.1 mg kg⁻¹) en las siembras de 1996 y 1998 para el fósforo y para el calcio (3.68 vs 2.64 y 3.40 vs 2.22 %) en las áreas

con mayor tiempo de explotación (1995 y 1996). Los resultados de este trabajo demostraron que con la evolución del sistema leucaena-guinea los cambios que ocurren en los componentes químicos del suelo no deterioran su fertilidad, sino la mejora (Alonso *et al.*, 2007).

Las principales características físicas que influyen sobre la estructura del suelo son la profundidad del espacio enraizable, el régimen de humedad (capacidad de agua útil, drenaje) y del aire (macroporosidad). Estas últimas propiedades, en iguales condiciones climáticas, son las principales causantes del cambio en la composición de la vegetación agroforestal y junto con la actividad antropogénica provocan el surgimiento de procesos de degradación de las propiedades de los suelos (Torres, 2005).

Considerando que las propiedades físicas son de interés en la detección de cambios en la estructura y composición de los suelos en un sistema agroforestal, y dada la importancia para el desarrollo agrícola-ganadero que representa la llanura costera norte de Nayarit, se valoraron propiedades del suelo: presentando una textura arcillosa (arena 29.1 %, limo 18.0 % y arcilla 52.8 %), pH neutro (7.0), MO 0.51 %, capacidad de intercambio catiónico (CIC) 24.0 cmol.kg⁻¹, Da 1.4 kg dm⁻³, CC 24.3 %. Se dio un seguimiento de dos muestreos por año, los resultados más sobresalientes a 6 años de implantado el sistema indican una disminución en la Da de 1.09 kg dm⁻³, un aumento en la MO de 3.85 %, Pt de 58 %, porosidad de aireación (Pa) 22.1 % y en la CC 35.9 %. El incremento de la MO propició cambios en la estructura del suelo al aumentar la velocidad de infiltración y mejorando la densidad aparente y capacidad de retención de humedad (Murray *et al.*, 2011).

Con la aplicación de las técnicas agroforestales, las actividades agrícolas y ganaderas adquieren un carácter permanente; su desarrollo no requiere de altos insumos, ya que el

uso de la maquinaria es mínimo, ni tampoco se precisa de altas dosis de fertilizantes ni pesticidas para mantener el sistema de producción de forma sostenible. En este sentido, los sistemas agroforestales se presentan como un reto para la esfera agropecuaria, por ser una solución económicamente viable, socialmente aceptada y que no produce daños ambientales (Bugarín *et al.*, 2010).

Una de las principales bondades de la presencia de árboles en los potreros y tal vez la principal está dada por su capacidad de extraer nutrientes (bombeo de nutrientes) de las partes profundas del suelo y ponerlos sobre la superficie, a disposición de los pastos o del cultivo asociado. Los árboles contribuyen a mejorar la productividad del suelo de forma sostenible y favorecen el crecimiento de hierbas deseables. Las raíces amarran a los suelos protegiéndolos del arrastre por el agua lo que permite controlar la erosión, además estas estructuras taladran la tierra lo que contribuye a disminuir la compactación de los suelos que es uno de los grandes daños que ocasiona el pisoteo del ganado.

La copa de los árboles, arbustos, hierbas y pastos actúan como capas de amortiguamiento al golpe de la caída del agua.

Las leguminosas arbustivas tienen la capacidad de fijar nitrógeno de la atmósfera y enriquecer el suelo debido a la asociación con microorganismos, pueden fijar en este hasta 300 kg de nitrógeno por hectárea por año y de 100 a 150 kg de nitrógeno por hectárea por año en el caso de leguminosas herbáceas (Ibrahim *et al.*, 2007).

Está claro que al mejorar las condiciones nutrimentales se presentan ventajas para los cultivos que demandan de ellos, pero hay que considerar que la absorción de elementos traza desde el suelo por las raíces, estos deben estar en contacto con su superficie.

Hay tres procesos físicos que gobiernan la absorción de nutrientes y otros iones al interior de las plantas: intercepción radical, flujo de masas, y difusión (Junk, 2000).

La intercepción radical permite la absorción de iones de escasa movilidad en el suelo como el fósforo y algunos micronutrientes (Claassen y Steingrobe, 1999).

Cuando las raíces absorben agua y nutrientes, crean gradientes de potencial para el agua del suelo y los nutrientes de la solución, en términos físicos se produce flujo de masas y flujo por difusión. El flujo de masas corresponde a una convección de nutrientes disueltos en la solución desde la matriz del suelo hacia la raíz arrastrados por transpiración.

La escasez de nutrientes minerales limita la producción vegetal en la mayoría de los ambientes. En condiciones naturales la cantidad de nutrientes disponible es siempre limitada y las adiciones externas son escasas, por lo que las plantas necesitan reciclar, reducir las pérdidas y maximizar la eficiencia en el uso de los nutrientes para conseguir una máxima producción de biomasa con una cantidad dada de nutrientes (Escudero y Mediavilla, 2003).

En el caso de algunos nutrientes la asimilación implica un cambio en el estado de óxido-reducción. Por tanto, la asimilación, además de la costosa inversión en raíces, implica un gasto energético directo, de modo que se pueden esperar mayores interacciones entre estos nutrientes y el carbono. Puede decirse, entonces, que las plantas tienen que utilizar los nutrientes para fijar más carbono y emplear luego el carbono para adquirir más nutrientes (Chapin *et al.*, 1987). El nitrógeno es uno de los elementos químicos cuya asimilación implica normalmente un gasto energético asociado a su reducción. Este elemento puede ser absorbido por las raíces en tres formas: como N orgánico, amonio o nitrato.

Evidentemente la necesidad de nutrientes para la producción vegetal convierte al reciclado interno en una adaptación de gran importancia. Contrariamente a los animales,

las plantas tienen que poseer una maquinaria específica para obtener los nutrientes independientemente de la energía. En consecuencia, reciclar los nutrientes puede contribuir decisivamente a reducir los costes de absorción.

Un fenómeno de reciclado frecuente en la mayoría de las especies vegetales perennes es la resorción de los nutrientes limitantes desde las hojas senescentes. Las hojas, a pesar de su relativamente escasa biomasa, acumulan gran cantidad de nutrientes y además son órganos con una corta vida y, por tanto con rápida renovación. Por ello, el reciclado eficiente de los nutrientes previamente incorporados en la hoja y que ya han llevado a cabo su contribución a la fotosíntesis puede tener un gran significado adaptativo. Por supuesto, los nutrientes pueden también reciclarse a través de la descomposición de la hojarasca en el suelo y de la reabsorción por las raíces, pero esta alternativa es evidentemente menos segura, porque, una vez en el suelo, pueden perderse por lixiviación, quedar inmovilizados en formas complejas o ser tomados por competidores (Escudero y Mediavilla, 2003). Sin embargo existen asociaciones que contribuyen a la absorción de nutrientes principalmente de fósforo y tal es el caso de las micorrizas.

2.5 Micorrizas

Las micorrizas representan las asociaciones simbióticas entre las plantas y hongos basada sobre el intercambio de metabolitos y nutrientes (Miransari *et al.*, 2009).

Más del 90 % de las plantas embriófitas son capaces de formar simbiosis con micorrizas, Tanto los hongos como las plantas tienen distribución universal, presentándose de esta manera ecotipos adaptados a condiciones diversas y extremas.

De acuerdo con Harley y Smith (1983), se admiten en general cinco tipos de micorrizas:

Ectomicorrizas. Los hongos que las forman, Basidiomicetes y Ascomicetes, desarrollan una espesa capa de micelio sobre la zona cortical de las raíces absorbentes de la planta, se producen principalmente sobre especies forestales y leñosas.

Endomicorrizas. Los hongos que las producen se caracterizan por colonizar intracelularmente el córtex radical. Dentro de este grupo existen tres tipos característicos:

Orquideomicorrizas (asociadas a Orquidiáceas).

Ericomicorrizas (ligadas a la Familia Ericáceas y con muchas similitudes estructurales con las ectendomicorrizas.

Micorrizas arbusculares formadas arbúsculos intracelulares las cuales son de mayor difusión e importancia económica y ecológica.

Se les llama arbusculares ya que en las células corticales de la raíces, sus hifas forman estructuras que parecen tener forma de arbolitos microscópicos. Además en muchas ocasiones al colonizar la planta intraradicalmente desarrollan unas estructuras que reciben el nombre de vesículas (donde almacenan sustancias de reserva), en algunas especies como *Glomus intraradices* también pueden formar esporas.

La formación de micorrizas arbusculares o endomicorrizas se inicia con la activación del micelio del hongo procedente, bien de la germinación de las esporas, o de fragmentos de raíces micorrizadas presentes en la mayoría de los suelos como restos de cultivos anteriores.

La asociación micorriza arbuscular es del tipo endomicorriza, por que el hongo coloniza, de manera obligada, intracelularmente las células corticales y epidermis de la raíz, pero no se introduce en el sistema vascular o en los meristemos de la raíz. Aunque los estados morfológicos de desarrollo son variables, pues dependen sobre todo de la especie de la

planta involucrada; en general las esporas del suelo germinan y la hifa fúngica crece desde la espora en el suelo, hasta la superficie de las raíces, donde son diferenciadas para formar el apresorio. Esta es la primera indicación de reconocimiento entre el hongo y la planta, ya que el apresorio no es formado sobre raíces no hospederas o sobre membranas o medios sintéticos. La penetración de la raíz ocurre por medio del apresorio, y el hongo con frecuencia se introduce forzando el camino entre las dos células epidérmicas (Harrison, 1997).

Las micorrizas están ampliamente distribuidas en condiciones naturales, se encuentran en todos los continentes, excepto en la Antártida; se dan en todos los suelos, incluyendo los de minas abandonadas, suelos agrícolas, suelos de pantanos y en hábitat acuáticos (Corwell *et al.*, 2001; Tang *et al.*, 2001).

Ha sido reportado que la colonización de plantas con micorrizas arbusculares mejoran la nutrición por macronutrientes como el nitrógeno y potasio. En suelos ácidos, las micorrizas pueden ser importantes para la asimilación de amonio (NH_4^+), que es menos móvil que el nitrato (NO_3^-) y donde la difusión puede limitar su velocidad de absorción (Cardoso y Kuyper, 2006)

Las hifas externas de las micorrizas arbusculares pueden ser capaces de utilizar el NO_3^- y NH_4^+ ; la información que se tienen acerca del papel de las vesículas y arbusculos en la asimilación del nitrógeno y como la colonización es influenciada por la disponibilidad individual y combinada de estos dos parámetros en el suelo no es comprendida aun.

De acuerdo a investigaciones realizadas, la aplicación de nitrógeno en el suelo puede tener cierto efecto inhibitorio o estimulante para la colonización de micorrizas arbusculares. De las dos fuentes de Nitrógeno, el NH_4^+ tiene efecto supresor sobre la colonización de estas micorrizas, debido a cambio en el pH de la rizósfera. Diversas

formas de nitrógeno inorgánico en el suelo puede influir en el porcentaje de colonización, la longitud de las raíces y la presencia de estructuras colonizantes como los arbusculos y vesículas (Ferrol *et al.*, 2002).

La fisiología de la planta micorrizada cambia completamente cuando se asocia al hongo. Mediante el micelio externo, el contacto entre las raíces y el medio se incrementa considerablemente. La inoculación con hongos formadores de micorrizas son conocidos por incrementar el crecimiento de muchas especies de plantas.

Es atribuido un incremento en la absorción de nutrientes, especialmente los de difusión limitada tales como: P, Zn, Cu, etc., producción de sustancias promotoras de crecimientos, tolerancia a estrés hídricos; salinidad, estrés por trasplante; resistencia a plantas por fitopatógenos e interacción sinérgica con otros microorganismos benéficos del suelo (Azcón y Barea, 1996; Bobby *et al.*, 2008).

La estructura y función de comunidades de micorrizas también puede variar con la edad de la planta, especialmente en especies perennes o semiperennes, se ha encontrado, que los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) dominantes en plántulas recién germinadas de especies forestales tropicales eran reemplazadas por otros tipos de HMA. Al realizar evaluaciones un año más tarde, las plantas de diferentes edades en un mismo sitio, presentaban diferentes comunidades de HMA asociadas a ellas (Husband *et al.*, 2002). Otros factores que pueden afectar positiva o negativamente la estructura y diversidad de comunidades de HMA son las poblaciones de otros microorganismos de suelo, las prácticas agrícolas como la tala de bosques, fuego, fertilización y labranza (Jansa *et al.*, 2003) y en forma indirecta el microclima y la topografía que afectan a las comunidades de plantas y por tanto afectan a las comunidades de micorrizas (Kernaghan, 2005).

La compactación reduce la fertilidad del suelo y la distribución de las raíces de las plantas y de las hifas de las micorrizas arbusculares en la rizósfera (Jeffries y Barea, 1999). Otro factor físico que afecta el funcionamiento de las micorrizas arbusculares, es la intensidad del pastoreo producidos por animales herbívoros. En tres especies de pastos, sometidas a defoliaciones, respondieron diferente con respecto a los cambios en la dinámica de micorrización. En *Digitaria* y *Lolium* la colonización disminuyó, pero la cantidad de hifas en el suelo no fue afectada. Por otra parte *Themeda*, quien es susceptible al pastoreo, no mantiene cantidades de hifas en el suelo después de la defoliación (Jeffries y Barea, 1999).

Los altos y bajos niveles de fósforo y la fertilización nitrogenada disminuyen el porcentaje de infección de las micorrizas, mientras que niveles moderados de P incrementa los niveles de nitrógeno y la infección por estos hongos (Safir y Duniway, 1991). La aplicación de estiércol y otras fuentes de materia orgánica influye sobre la estructura, pH, la cantidad de nutrientes y la retención de humedad en el suelo, todo esto influye directa o indirectamente sobre la eficiencia y el desarrollo de las micorrizas.

La aplicación de fertilizantes orgánicos y materia orgánica (estiércol de bovino), incrementan la cantidad de micelios y la esporulación de las micorrizas arbusculares en el suelo (Jeffries y Barea, 1999).

Las micorrizas incrementan la tolerancia de las plantas al pastoreo por animales herbívoros, por un incremento en el suministro de nutrientes a las plantas huésped, los cuales estimulan el rebrote continuo de las pasturas después de las defoliaciones hechas. La diversidad de especies de micorrizas arbusculares decrece con el pastoreo moderado y alto a través de los años. Los resultados encontrados sugieren que la defoliación, por el pastoreo de animales, altera fuertemente el desarrollo de las reservas de las plantas para

estimular fuertemente el desarrollo de la simbiosis. Los cambios en la composición de las especies de micorrizas y el decrecimiento en la diversidad con el pastoreo continuo, indican que la defoliación provoca la alteración del microambiente del suelo y como consecuencia disminución en la diversidad, pero esto a la vez conduce a que ciertas especies de micorrizas puedan adaptarse a las condiciones del pastoreo (Ahn-Heum *et al.*, 2001).

Las micorrizas arbusculares son un importante factor biológico dentro de la estructura y funcionamiento de los suelos e inciden sobre el comportamiento ecológico, productividad y composición de comunidades vegetales naturales, así como de cultivos agrícolas y plantaciones forestales. Los hongos formadores de micorrizas arbusculares deben ser considerados, entonces, como parte de la diversidad biológica de los suelos y deben ser incluidos tanto en los inventarios como en los análisis de la biodiversidad a nivel de ecosistemas y agroecosistemas (Pérez *et al.*, 2011).

2.6 Alternativa con limón en Apatzingán Michoacán

El municipio de Apatzingán, Michoacán se ubica a 350 metros sobre el nivel del mar. La agricultura es de riego, en menor cantidad la agricultura de temporal, los cultivos principales son el limón mexicano, papaya, mango, pepino, sandía, se desarrollan en suelos característicos por ser arcillosos, con pH entre 7.3 a 8.5, baja concentración de materia orgánica (entre 1 a 2 %) y alta concentración de carbonatos de calcio (>10%), características que disminuyen la disponibilidad de nutrimentos como nitrógeno, fósforo, hierro, manganeso, zinc y cobre, fenómeno que se manifiesta de manera visible en los árboles de limón (Chávez, 1996).

Se han desarrollado trabajos de investigación y de acuerdo con Maldonado *et al.* (2001), encontraron que los suelos del valle de Apatzingán con huertos de limón, presentan contenidos de carbonato de calcio mayores a 1% de carbonato de calcio, pH alcalino (mayor a 7.0) pobres en materia orgánica, un contenido de medio a bajo en nitrógeno inorgánico y fósforo, altos en potasio, calcio, magnesio y bajos en hierro, manganeso zinc y cobre, condiciones que afectan a la fertilidad y nutrición del limón mexicano, reflejado en la deficiencia nutrimental de la planta.

La presencia de carbonato de calcio según Obreza *et al.* (1998), afecta la disponibilidad de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, hierro, manganeso, zinc y cobre. En estos suelos el NH_4^+ puede transformarse a NH_3^- perdiéndose por volatilización (Tisdale *et al.*, 1993), o nitrificarse (Obreza *et al.*, 1998) el cual puede lixiviarse. Sin embargo es común que para fertilizar los huertos de naranjo se utilicen de 100 a 300 kg de N ha^{-1} (Cohen, 1976) y una dosis arriba de los 360 kg en huertos muy productivos que en las condiciones de suelos alcalinos pudiesen representar pérdidas potenciales (Tisdale *et al.*, 1993).

En el manejo de monocultivos de cítricos, (naranja, mandarina, limón, toronja y tangelo), uno de los principales problemas es el crecimiento excesivo de gramíneas, leguminosas y otras arvenses entre los árboles.

Estas plantas, que en un sistema ganadero alledaño serían la base misma de la actividad productiva, se convierten en malezas en el sistema agrícola especializado, donde su control mecánico y químico es uno de los principales costos, especialmente durante los primeros cinco años.

Al sistema ganadero, le falta sombra para sus animales, que es uno de los factores limitante de la productividad y el bienestar de los animales.

Por lo tanto, integrar ambos usos de la tierra en un solo sistema, podría ser una solución para ambas partes.

Contexto ganadero (2013), estableció un sistema silvopastoril intensivo con leucaena en los callejones de su huerto limonero. Tantos años de monocultivo ocasionaron problemas en las regiones productoras de limón, tales como la alta frecuencia de enfermedades virales transmitidas por insectos, la pérdida de la actividad biológica debido al uso continuado de herbicidas, que limita la respuesta de los árboles a los fertilizantes.

En 2009, el Rancho Chandio, situado en el Ejido de La Concha, en Apatzingán, inició una interesante transformación de su huerto limonero, 5 hectáreas del huerto fueron convertidas a sistemas silvopastoriles intensivos con limón, y las restantes 5 hectáreas continuaron funcionando como un huerto limonero convencional.

Para incorporar el sistema silvopastoril intensivo en el cultivo de limón, se aprovechó el espacio disponible entre los cítricos, que fueron establecidos a una distancia de 7 x 7 m. Entre los callejones de limón se sembraron 3 hileras de leucaena (*Leucaena leucocephala* cultivar *Cunninham*), a 1.20 metros de distancia entre hileras (Contexto ganadero, 2013).

Se usaron 8 kilos de semilla de leucaena por hectárea, sin riego adicional al que recibe el limón. Dos meses después de la siembra directa de la leucaena, se estableció el pasto Tanzania (*Panicum maximum* cultivar *Tanzania*).

El huerto limonero silvopastoril tiene una capacidad de carga equivalente al 60% (2.4 UA/ha, unidades animales de 450 kg) de la que se registra en un sistema silvopastoril intensivo (4 UA/ha) típico en esta región.

Anteriormente, el huerto era fertilizado tres veces al año con una mezcla de sulfato de amonio, urea, elementos menores y abono orgánico (compost de estiércol y micelio de hongos).

La fertilización representaba el 30% del costo de producción y el control de plagas, otro 30%. Con la introducción de la leucaena y el reciclaje de nutrientes que promueven las heces y orina del ganado, la fertilización dejó de ser necesaria, lo cual permitió eliminar por completo este costo (Contexto ganadero, 2013).

Era de suponer que con la introducción del ganado en el huerto limonero estaría acompañada de una reducción en la producción de limón. Sin embargo, mejoró la calidad del fruto en términos del tamaño y color.

2.7 Análisis de suelo en el diagnóstico nutrimental

Las características físico-químicas del suelo, deben ser conocidas, ya que el crecimiento y desarrollo de los cultivos y la cantidad y calidad de las cosechas, están en relación directa con los nutrimentos y las características de los suelos.

Cuando los nutrimentos no están en cantidades adecuadas, hay necesidad de adicionar fertilizantes químicos o enmiendas para suplir las necesidades y corregir condiciones adversas.

El análisis de suelos es una herramienta de diagnóstico que nos permite tener una estimación de la fertilidad del suelo, resultado de un conjunto de ensayos físicos y químicos practicados en la muestra de suelo.

La fertilidad es vital para que un suelo sea productivo, aunque un suelo fértil no necesariamente es productivo, debido a que existen otros factores de tipo físico como el mal drenaje, escasa profundidad, piedra superficial, déficit de humedad etc., que pueden limitar la producción, aun cuando la fertilidad del suelo sea adecuada.

El grado de potencial productivo de un suelo está determinado por sus características químicas y físicas.

Su objetivo es proveer una medida del contenido y variabilidad de los principales nutrientes. Sin embargo, en su implementación, el punto más crítico es la representatividad de la unidad de muestreo, porque sólo se analiza una pequeña cantidad que representará la información de todo el lote o parcela en cuestión.

De acuerdo con Sumner (2000), menciona que los nutrientes en el suelo se hallan en distintas formas y varían en nivel de disponibilidad, muchos nutrientes se encuentran en la solución del suelo (inmediatamente disponibles pero en pequeñas cantidades), en forma intercambiable (rápidamente disponible en grandes cantidades), o dentro de la estructura cristalina de las arcillas (lenta a muy lentamente disponible en grandes cantidades), por lo que para que un análisis de suelo provea información significativa para predecir requerimientos de fertilización de un cultivo, debe ser capaz de evaluar las cantidades del nutriente en aquellas categorías que estarán disponibles para el cultivo a diferentes tasas a lo largo de la estación de crecimiento.

2.8 Análisis de tejido vegetal

Uno de los factores que más afecta el rendimiento y la calidad de los cultivos es su estado nutricional. Esta determinación requiere análisis muy precisos, para conocer el estado nutricional, una característica "oculta" cuyos síntomas visibles aparecen cuando existe ya un balance inadecuado entre los nutrientes.

Los análisis foliares o de tejidos vegetales son el complemento indispensable a los análisis de suelo. Ambos son necesarios para lograr un buen diagnóstico. Actualmente,

con la posibilidad de suministrar nutrientes a través de sistemas de irrigación, los análisis de tejidos vegetales han venido adquiriendo una importancia cada vez mayor.

Pero para poder determinar la concentración de nutrientes en las plantas requiere de instrucciones de muestreo muy específicas en cuanto a la parte de la planta y la etapa de crecimiento ya que, para poder interpretar correctamente el resultado de una prueba, es necesario compararla contra rangos de valores normales o estándar. Estos valores provienen del análisis de un gran número de muestras, recogidas de establecimientos de producción normales, que desde su fundación, ha venido realizando en varios países. Cuando no existen o no se tienen instrucciones precisas de muestreo, la regla general es la de seleccionar hojas recientes, maduras fisiológicamente.

En cultivos de más de un año o en individuos que permanecen en el suelo más de un ciclo productivo, como es el caso de frutales, el análisis de planta ha sido y es ampliamente adoptado como herramienta para orientar recomendaciones de fertilización. Diversos estudios indican que el número de plantas y el número de hojas individuales a coleccionar tienen una influencia directa en la variación de los resultados. Se observa como dicha variación es afectada en forma más significativa por el número de árboles muestreados que por el número de hojas muestreadas por árbol. En muchos casos es preferible seleccionar más plantas para el muestreo, que coleccionar muchos tejidos de pocas plantas.

Ulrich (1948) define el análisis foliar como una herramienta importante para detectar problemas nutricionales en la planta. El tejido vegetal complementario al análisis de suelos, refleja el flujo de nutrientes en el sistema y ayuda a definir las acciones correctivas que tiendan a elevar y mantener la productividad.

El diagnóstico foliar debe seguir procedimientos normalizados para que pueda ser utilizado. Debe existir una relación directa entre el suministro de nutrientes y el crecimiento de la producción. Un suelo fertilizado debe permitir un mayor crecimiento, dado que existe un aumento en el suministro de nutrientes, por lo que el contenido en hoja debe aumentar y, en consecuencia la producción (Malavolta *et al.*, 1997). Aunque otros órganos pueden ser utilizados para el análisis, se hace uso preferiblemente, de las hojas, ya que se consideran el centro de la actividad fisiológica de la planta, haciéndolas más adecuados para el diagnóstico de deficiencia o exceso de nutrientes en el suelo (Malavolta, 2006).

Osman (2013) menciona que para la interpretación de un análisis foliar pueden ser establecidos 3 umbrales: el umbral de deficiencia con síntomas visibles y bajos rendimientos, el umbral de suficiencia por encima del cual se obtienen altos rendimientos y por debajo del cual el rendimiento disminuye lo que representa por tanto, posibilidad de respuesta a la adición de nutriente, y por último el umbral de toxicidad que representa concentraciones por encima de las cuales la planta presenta problemas.

2.8.1 Índice de balance Kenworthy

Los Índices de Balance de Kenworthy han sido utilizados exitosamente en México para diagnosticar el estado nutrimental del Aguacate ‘Hass’ bajo condiciones de temporal (Salazar-Garcia y Lascano-Ferrat, 1999), Mangos ‘Haden’ y ‘Tommy Atkins’ en Nayarit (Salazar *et al.*, 1993), Cítricos en Michoacán (Maldonado *et al.*, 2001), Claveles (Maldonado y Vergara, 1999), entre otros.

Este índice fue propuesto por Kenworthy (1961) definió el valor estándar como el valor igual a la media de la concentración nutrimental de hojas muestreadas en un estado particular, de árboles que tuvieran un desarrollo hortícola deseable. Para generar el

estándar se selecciona el 10% superior de una población que exhiba un atributo deseado, (por ejemplo altos rendimientos) y un coeficiente de variación (CV) menor al 34%.

La obtención de estos índices se considera variabilidades expresadas por los valores de los coeficientes de variación para cada uno de los nutrientes en la población de la que se obtuvo la norma. Puesto que el contenido de un determinado nutriente en la muestra es más pequeño que su contenido en la norma, la influencia de la variabilidad se añade, cuando éste contenido es superior al nivel de la norma, la influencia se resta, la obtención, es balanceada (Kenworthy, 1961).

Kemworthy (1967) propuso que las concentraciones nutrimentales de una muestra se expresen como porcentaje del valor estándar y se ajusten mediante el CV del estándar. Los resultados de concentraciones nutrimentales o de huertos manejados mediante índice de balance uniformizan su valor y permiten hacer comparaciones más fáciles y objetivas entre los nutrimentos (Kenworthy, 1961).

Según Sumner y Boswell (1981) este método lista los nutrimentos en orden de requerimiento y evalúa el balance entre ellos, pero presenta desventajas como son: la interpretación es afectada por el tipo y posición de hoja en la planta, los estándares nutrimentales deben de obtenerse de una población homogénea para cada etapa del cultivo, lo que obliga a diagnosticar solo para el estado de crecimiento en el cual se obtuvo la norma.

Ventajas. Permite obtener el desbalance relativo entre los nutrimentos listándolos mediante un orden de requerimiento nutrimental.

Maldonado *et al.* (2001) mencionan que los índices de balance Kenworthy para limón mexicano, como se muestra en el Cuadro 3, pueden utilizarse en el diagnóstico del estado nutrimental de esta especie en el Valle de Apatzingán, y en huertos que se

desarrollen en condiciones similares de suelo y clima, con potenciales de rendimiento similares. El órgano de referencia son hojas de cuatro a siete meses de edad, correspondientes a la quinta posición de la rama (contando desde el ápice) y en ramas ubicadas en la parte media del árbol.

El diagnóstico mediante el orden de requerimiento nutrimental (ORN) indicó, en primer lugar que un porcentaje importante en los huertos de limón mexicano presenta algún grado de insuficiencia nutrimental. Entre los problemas más significativos, destaca la situación de los nutrimentos, Mn, Zn, Fe y B que resultaron ser los elementos más requeridos por el cultivo, con concentraciones de 79, 66, 64 y 60% respectivamente, abajo del valor normal. Sin duda, esta situación afecta la obtención de rendimientos máximos que se pueden alcanzar en estos huertos.

Cuadro 3. Estándares Kenworthy establecidos para limón mexicano, que se cultiva en el Valle de Apatzingán, Michoacán, México.

Nutrimento	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	----- % -----					----- mg kg ⁻¹ -----				
Media	2.8	0.21	1.57	4.72	0.49	88	55	27	11.5	64
CV ^Z	18.9	22.4	23.2	30.2	35.6	46.5	40.1	25.7	36.2	27.5

^ZCV= Coeficiente de variación

Los índices de balance Kenworthy estimados para aguacatero “hass” permitieron determinar que en términos generales, el Zn, Mn y Cu, se encuentran en niveles deficientes y abajo del normal, el B en exceso y el K, N, Mg y P en concentración normal. Los intervalos de concentración foliar generados para el cultivo de aguacate en la región Purépecha, presentan diferencias respecto a valores establecidos por otros

investigadores para regiones productoras de otros países (Maldonado-Torres *et al.*, 2007).

Maldonado *et al.* (2008) encontraron en un diagnóstico nutrimental foliar inicial (enero del 2003), en limón “persa” Emiliano Zapata, Veracruz, por orden de requerimiento nutrimental y mediante el índice de balance Kenworthy, abajo del normal se ubicó $P > Mg > K > Zn > Mn$, normal $Ca > N > Cu$, arriba del normal el Fe. Pero en general con este método se estableció que el cobre, manganeso, calcio y hierro son los más requeridos, mientras que el magnesio, zinc, potasio, fósforo y nitrógeno son los menos deficientes.

2.8.2 Desviación Óptima Porcentual

Desviación óptima porcentual (DOP), también considerada un método estático, usa una comparación de la concentración del nutriente respecto a una norma, pero una expresión porcentual (Montañés *et al.*, 1991). En otras palabras, hace una cuantificación de la cantidad que un dato se diferencia de la norma. Esto permite una clasificación de los nutrientes en el orden de su efecto limitante. De esta forma la sumatoria de los valores absolutos de los índices representa el balance nutricional completo de la planta.

Sin embargo no tiene en cuenta la variabilidad debida al momento del muestreo, ni las relaciones entre los nutrientes. En este método, el valor nutrimental óptimo para cualquier elemento es igual a cero, de modo que los valores positivos indican excesos y los negativos deficiencias. Permite calcular el índice de desbalance nutrimental (IDN), que se refiere a la suma de los valores absolutos de los índices DOP y representa el balance nutrimental total de la planta, que puede relacionarse con el rendimiento (Lucena, 1997). El método de interpretación (DOP) detectó el mayor número de nutrimentos deficientes en plantaciones de naranja cv. Valencia, cultivada en suelos

ácidos de Huimanguillo, Tabasco, México. Las deficiencias detectadas fueron: N, P, K, Mg, Ca, Cu, Fe, B, y Mn. Al determinar el ORN a partir de la mayor deficiencia se encontró que los requerimientos nutrimentales fueron de: $Cu > Mg > Fe > P > K > Ca > B > N > Mn$ (Ventura *et al.*, 2012).

Con el método desviación del óptimo porcentual (DOP), todos los índices (excepto Fe) fueron deficientes; para la mayoría de los grupos de guayabos su orden de requerimiento nutrimental (ORN) de macronutrimentos fue: $P > Mg > Ca > N > K$. El ORN de los micronutrimentos fue $Zn > Mn$ (Damián-Nava *et al.*, 2006).

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Comparar la producción de limón mexicano, con manejo convencional y silvopastoril, a través del análisis de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y el estado nutrimental de los árboles, para incrementar la producción sin deterioro del ambiente.

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el estado de la fertilidad del suelo con manejo convencional y silvopastoril, mediante el análisis de las propiedades químicas, y de retención de humedad.
- Diagnosticar el estado nutrimental del limón mexicano en el sistema convencional y silvopastoril con base en el análisis foliar y mediante la estimación de los índices de balance Kenworthy, desviación óptima porcentual (DOP), para identificar el orden de requerimientos nutrimentales.
- Evaluar el efecto del manejo en el tamaño y peso de los frutos, cantidad y pH del jugo, grados brix, cantidad de nutrimentos y rendimiento.
- Generar recomendaciones de fertilización para corregir deficiencias nutrimentales.
- Determinar el efecto del manejo silvopastoril y convencional en la temperatura foliar externa, unidades SPAD, porcentaje de colonización micorrícica de los árboles de limón en producción, y su influencia en la calidad del producto.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación del sitio

El área de estudio se ubicó en las coordenadas geográficas son 19°06'0" de latitud norte y 102°22'00" de longitud oeste del meridiano de México, a una altura de 350 metros sobre el nivel del mar. El clima dentro del municipio de Apatzingán, Michoacán es tropical, seco estepario, con lluvias en verano de 924 mm.

Con una temperatura entre 8 y 39.8 °C, la condición climática calurosa y la eliminación de la cubierta vegetal han hecho que el tipo de vegetación dominante sea la selva baja caducifolia, con especies de parota (*Enterolobium cyclocarpum*), zapote (*Manilkara zapota* (L.) Van Royen), Palo de Oro (*Lonchocarpus caudatus*), Rosa Morada (*Tabebuia rosea*); el bosque tropical espinoso, con cardón (*Euphorbia canariensis*), teteche (*Neobuxbaumia tetetzo*), viejito (*Cephalocereus senilis*), huisache (*Acacia farnesiana*), amole (*Ziziphus amole*) y selva mediana en algunos recónditos.

El suelo predominante en el Valle de Apatzingán es el Vértisol Pélico, seguido de Litosol y el Feozem Háptico (CONAFOR, 2009).

4.2 Condiciones del experimento

El estudio se llevó a cabo en dos parcelas experimentales de limón mexicano de 5 ha cada una, ya establecidas y en producción, las cuales tienen un diseño de plantación en marco real, a una distancia de 7x7 m, donde se evaluaron dos tratamientos, una parcela con manejo silvopastoril desde el 2009, en la que se combinan (limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) plantación de 7 años, leucaena (*Leucaena leucocephala* variedad Cunningham), pasto tanzania (*Panicum maximum* cultivar Tanzania), y bovinos de

doble propósito), entre las plantas de limón se tienen tres hileras de leucaena, con un distanciamiento de 1.20 m, orientación este-oeste, con fertilización orgánica.

La parcela con manejo convencional de limón fue establecida desde la década de 1980, controlando arvenses de forma manual y mecánica, con fertilización química, ambas parcelas con riego por gravedad.

La investigación se dividió en tres fases: en la primera se obtuvieron las muestras de suelo, foliares y de fruto en cada sistema, se extrajeron raíces secundarias, se registró la temperatura foliar externa, se registraron las unidades SPAD de las hojas. En la segunda fase el análisis fisicoquímico de las muestras y en la tercer fase se realizó el análisis estadístico e interpretativo de los resultados.

4.3 Análisis de suelo

4.3.1 Análisis físico del suelo

Se colectaron cinco muestras inalteradas de suelo en forma aleatoria, por cada parcela experimental a una profundidad 0-30 cm, en la zona de goteo y los análisis consistieron en caracterizar la parte sólida, contenido de agua, y en que proporciones está cada una de las fracciones que componen ésta. Dentro de las más importantes que afectan el desarrollo de las plantas y las condiciones de fertilidad, está la textura, que corresponde a las proporciones de arena, limo y arcilla presentes en el suelo, determinada con (hidrómetro de Bouyoucos). La densidad aparente indica el peso de un volumen de suelo, incluyendo el espacio poroso (método de la parafina) mediante los procedimientos descritos en la NOM-021- SEMARNAT-2000 para el análisis de fertilidad de suelos. Determinación de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, curvas de retención de humedad (Manual de prácticas. 2011).

4.3.2 Análisis químico del suelo

Se colectaron cinco muestras de suelo en forma aleatoria, por cada parcela experimental a una profundidad 0-30 cm. Cada muestra se extrajo con una barrena tubular RM-100 e integrada con 25 submuestras obtenidas de manera aleatoria, de la zona de goteo de los árboles de limón. Las muestras se secaron hasta peso constante, y fueron tamizadas en una criba del número 12 y preparadas para determinar pH, CIC, materia orgánica (Walkley y Black), N inorgánico, P (Bray-1) y determinado en espectrofotómetro de luz, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, y B, mediante los métodos descritos en la NOM-021-SEMARNAT-2000. Los resultados se clasificaron de acuerdo a Ankerman y Large (1977) y SEMARNAT (2002).

El CaCO_3 total se determinó por el método Horton y Newson (1953) y el CaCO_3 activo por el procedimiento de Dupuis (1969). Los resultados obtenidos fueron clasificados por valores de referencia, mediante resultados establecidos en la Norma 021.

4.4 Muestreo de tejido vegetal y análisis

4.4.1 Diagnóstico nutrimental foliar

Para hacer el diagnóstico del estado nutrimental de los árboles de limón mexicano se obtuvieron 10 muestras de hojas. Cinco muestras de cada parcela, obtenidas de manera aleatoria mediante la colecta de 100 hojas, cortadas de cada punto cardinal de 25 árboles. Hojas sanas, fotosintéticamente activas, de 4 a 7 meses de edad, ubicadas en ramas sin fruto, en la quinta posición contando desde el ápice de la rama. Las hojas se colocaron en bolsas de papel, previamente identificadas para cada sistema y ordenadas dentro de hieleras portátiles para su conservación y traslado al laboratorio donde se prepararon y analizaron las concentraciones de nutrientes (Maldonado *et al.*, 2001).

Cada muestra se lavó de acuerdo al procedimiento propuesto por Chapman (1960), secadas a 70 °C durante 48 horas en estufa con circulación de aire forzado y se molieron a malla 20 en un molino de acero inoxidable (Etchevers, 1988). La digestión del material se realizó con ácido sulfúrico ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$).

La concentración de K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu, y B en el digerido fue determinada en el espectrofotómetro de absorción atómica. El N se determinó con el método Kjeldal mediante destilación por arrastre de vapor (Bremer, 1965) adaptado para análisis de plantas y modificado con ácido salicílico para incluir nitratos. Por su parte P se determinó mediante el método del vanadato molibdato.

La interpretación de los resultados nutrimentales para limón mexicano, se realizó a través del índice de balance Kenworthy (1961) y Desviación óptima porcentual (DOP), para lo cual se ocuparon los valores del análisis foliar (valor de la muestra), comparados con los estándares y coeficiente de variación, generados por Maldonado *et al.* (2001).

De acuerdo a las siguientes fórmulas, se obtuvo el índice de balance Kenworthy, donde los valores de la muestra son expresados en porcentajes de los estándares ajustados mediante el coeficiente de variación. Para ello, el índice de balance de cada nutrimento fue calculado y se ordenan de menor a mayor, de tal forma que los más bajos son los de mayor requerimiento por el cultivo.

Si M es $<$ que S .

1. $P = (M/S) * 100$
2. $I = (100 - P) * (CV/100)$
3. $B = P + I$

Si M es $>$ que S .

1. $P = (M/S) \cdot 100$

1. $I = (P - 100) \cdot (CV/100)$

2. $B = P - I$

Dónde:

M= valor de la muestra, S= valor del estándar, P= % respecto al estándar.

CV= coeficiente de variación, I= influencia de variación, B= índice de balance.

Con los índices de balance Kenworthy se elaboró el diagnóstico para los sistemas convencional y silvopastoril, determinándose los valores de escasez (17 a 50), abajo del normal (50 a 83), normal (83 a 117), arriba del normal (117 a 150) y exceso (150 a 183) (Kenworthy, 1967).

Para la desviación óptima porcentual (DOP) se, generaron valores negativos en caso de déficit y positivo en caso de exceso. Cuando el valor de concentración de la muestra coincidió con el de la referencia, el valor absoluto indicó la gravedad de la situación.

Este se expresó con la formula $DOP = (C \cdot 100 / C_s) - 100$ donde:

C: Concentración foliar de la muestra analizada

Cs: Concentración óptima para condiciones similares del valor de la muestra.

4.4.2 Análisis de hierro activo

El Fe activo (Fe^{2+}) de muestras de hojas jóvenes se extrajo con 1-10 orto-fenantrolina de muestras de hojas jóvenes, bajo el principio de quelatar preferentemente Fe^{2+} formando un compuesto altamente estable, el cual fue determinado por colorimetría a una longitud de onda de 510 nm (Katyal y Sharma, 1980).

4.5 Frutos de limón mexicano

4.5.1 Análisis de nutrientes en los frutos

La cosecha se realizó cuando los frutos estaban en madurez fisiológica, un tamaño mayor a 31 mm de diámetro, cáscara lisa, color verde intenso y contenido de jugo mayor del 45 % (SAGARPA, 2001).

Se obtuvieron cuatro muestras de 10 frutos cada una por cada sistema, llevadas a la estufa hasta peso constante, posteriormente se molieron en un molino de acero inoxidable y se determinó la cantidad de nutrimentos.

4.5.2 Análisis de las principales variables en los frutos

Con los frutos se realizó la medición del diámetro ecuatorial, peso fresco de los frutos, cantidad de jugo, pH y grados brix, porcentaje de humedad, como características indicadoras del efecto de la forma de manejo de cada sistema, así como la fertilidad del mismo. Para ello se colectaron en cada sistema frutos en forma aleatoria, y se integraron cuatro muestras, se pesaron de forma individual en una báscula digital.

Se determinó el diámetro ecuatorial con un vernier y a cada muestra se le extrajo el jugo (mm) el cual se midió con una probeta y se pesaron (g) con bascula granataria.

La cascara fue separada y pesada fresco y posteriormente se metió a la estufa hasta peso constante para determinar el porcentaje de humedad, el contenido de sacarosa fue determinado a través del refractómetro.

4.5.3 Medición del rendimiento

Se eligieron y marcaron 5 árboles de limón mexicano por hectárea, a los que se les determino la cantidad de fruta producida durante un ciclo, así se obtuvo el rendimiento por árbol y por hectárea.

4.6 Propuesta de fertilización por sistema de producción

Las propuestas se generaron para el sistema convencional y silvopastoril, para ello se tomó en cuenta el análisis del suelo y de planta.

De acuerdo a Etchevers (1987) propone la fórmula para generar una dosis óptima de fertilización:

Dosis de fertilización requerida por el cultivo = f [requerimiento nutrimental del cultivo (a) menos la disponibilidad de nutrimentos en el suelo (b), con relación a la eficiencia de los fertilizantes (c)].

a) El requerimiento nutrimental del cultivo se calculó al considerar la extracción por tonelada de fruta que se cosecha, más el doble de extracción por la inversión que hace la planta para la generación y el mantenimiento de órganos, multiplicada por la producción esperada de 30 convencional y 22 silvopastoril $t\ ha^{-1}$ y la eficiencia de los fertilizantes.

b) Para sustituir la disponibilidad de nutrimentos, se utilizaron los resultados obtenidos del análisis del suelo (Cuadro 5). Se transformó la cantidad de nutrimento por kg de suelo, en kg de nutrimento por hectárea.

c) Posteriormente, se calculó la dosis de fertilización tomando en cuenta los incisos a y b; se consideró también la eficiencia de los fertilizantes

4.7 Análisis de temperatura foliar externa

La temperatura de superficie de las hojas se determinó mediante el termómetro láser PCE-Instruments indicado para medir temperatura sin contacto a través de la emisión de una radiación infrarroja. Para ello, se consideraron 5 muestras al azar por parcela con 6 hojas cada una. La temperatura fue determinada cuando la incidencia de calor se presentó con mayor intensidad, alrededor de las 14:00 horas.

4.8 Análisis de unidades SPAD

La medición del color verde de las plantas fue realizada mediante el uso del SPAD Minolta 502, el cual permite determinar de manera indirecta la concentración de clorofilas, sin destruir la planta. La determinación se realizó introduciendo la hoja en la pinza del medidor y apretando éste menos de 2 segundos. Para ello, en cada parcela experimental se tomaron tres muestras de 30 hojas cada una. Las hojas fueron seleccionadas de manera aleatoria para hacer la lectura SPAD.

4.9 Porcentaje de colonización micorrícica

Se colectó una muestra compuesta por hectárea de raíces secundarias en forma aleatoria (Ruiz y Davey, 2005) integradas por cinco diferentes árboles de limón, con un muestreo superior de 2 árboles más, comparado con lo reportado por (Muños *et al.*, 2009) lo que resultó 25 árboles por cada parcela experimental, para obtener un volumen suficiente de raíces.

Los puntos de muestreo se realizaron en diferentes áreas dentro de la zona de goteo con el fin de hacer un muestro representativo y obtener material para el trabajo de laboratorio.

Una vez localizada la porción de raíz, esta se desprendió y se introdujo en una bolsa de plástico para protegerla, se identificó y se colocó en una hielera para su conservación, en el laboratorio se lavaron con abundante agua para eliminar el suelo adherido.

Con las muestras de raíces se procedió a la tinción, un procedimiento ampliamente usado con ligeras modificaciones para visualizar la micorriza V-A (Phillips y Hayman, 1970).

Estos involucraron: a) clareo, b) blanqueo, c) acidificación, d) tinción, e) decoloración.

Las raíces más delgadas se cortaron a un tamaño de 1.5 cm y colocaron en cápsulas

esterilizadas, previamente identificadas, y sumergieron en un vaso de precipitado al que se le agrego suficiente KOH al 10% para cubrirlas. Se puede calentar por 10 minutos bajo 10 libras de presión (clareo), pero en este caso las raíces estuvieron a temperatura ambiente durante 36 horas con cambios constantes KOH, hasta que la solución queda de color claro, se retira el KOH y las cápsulas con raíces se enjuagan con agua destilada, se agrega H_2O_2 al 10% en suficiente cantidad para que cubra las raíces durante tres minutos, pasado este tiempo se procede a enjuagar con agua destilada (blanqueo).

Las raíces se cubrieron con HCl al 10% por tres minutos, se eliminó el ácido y sin enjuagar se procedió a la tinción (acidificación), las capsulas que contenían las raíces se cubrieron con una solución colorante (azul tipano 0.05% en lactoglicerol) y se calentaron por 10 minutos a 10 libras de presión (tinción). El colorante fue eliminado y las raíces fueron decoloradas con lactoglicerol.

4.9.1 Determinación del porcentaje de colonización micorrízica en raíces

Para hacer esto fue necesario evaluar microscópicamente la morfología interna de la simbiosis, se pueden utilizar diversos métodos, dependiendo de la precisión que se requiera, y un método es el empleado por Phillips y Hayman (1970), este requiere del montaje de raíces teñidas en portaobjetos, posteriormente se evaluó en microscopio óptico.

Montaje en portaobjetos. Se colocaron raíces clareadas y teñidas en cajas Petri con suficiente lactoglicerol. En un portaobjetos y con agujas de disección se colocaron 20 segmentos de aproximadamente 1.5 cm, paralelamente unos a otros, 400 segmentos de raíz, 200 en el convencional y 200 en el silvopastoril. Sobre las raíces se adicionaron gotas de lactoglicerol colocando los cubreobjetos, se eliminaron las burbujas y cada laminilla se selló con esmalte. Para analizar se observó al microscopio con un aumento

de 40 y 100x, con tres pasajes equidistantes por cada laminilla. Al revisar un campo óptico donde se encontró un segmento con hifas (h), vesículas (v) y/o arbuscúlos (a), se identificó con sus respectivas iniciales y la suma de las estructuras observadas dio como resultado el total de micorrizas.

Dependiendo del número de observaciones se obtuvo el porcentaje de colonización micorrícica, de acuerdo a la siguiente formula.

% de colonización micorrícica = (número de campos colonizados /número de campos observados) *100

% de hifas= (número de campos con hifas /número de campos observados) *100

% de vesículas= (número de campos con vesículas /número de campos observados) *100

4.9.2 Análisis estadístico de las principales variables

Los sistemas de producción de limón mexicano fueron analizados estadísticamente a través de un muestreo con diseño completamente al azar, para sustentar las principales diferencias entre las variables establecidas.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis físico del suelo

Los resultados encontrados en este trabajo, como se muestran el Cuadro 4, para la variable densidad aparente (Da), indican que en ambos sistemas se tiene un proceso de compactación, ya que los valores de acuerdo a la textura se clasificaron como suelos arcillosos, y estos deberían tener 1.1 g/cm^3 para condiciones normales, pero se encontraron valores mayores a 1.7 g/cm^3 , aunque los suelos fueron de textura arcillosa varían en sus porcentajes y en el sistema silvopastoril comparado con el convencional se encontró 33.07% más de arena, similar porcentaje de limo y 12.04% menos de arcilla, 6.83% menos capacidad de campo y 9.38% menos punto de marchitez permanente.

Cuadro 4. Propiedades físicas del suelo con limón mexicano.

Variable	Convencional	Silvopastoril
Da (g/cm^3) ^z	1.74	1.78
Textura	Arcillosa	Arcillosa
Arena (%)	17	25.4
Limo (%)	13.28	13.28
Arcilla (%)	69.72	61.32
CC (%) ^y	68.72	64.02
PMP (%) ^x	58.51	53.02

^zDa: Densidad aparente, ^yCC: Capacidad de campo, ^xPMP: Punto de marchitez permanente.

Al hacer comparaciones con otras investigaciones se obtuvo mayores porcentaje de arcilla, pero mucho menores en limo, comparado con Sustaita *et al.* (2000) quienes reportan arcilla menor de 20 %, limo (alrededor de 50 %), con estos datos mencionan

que el efecto de la labranza se reflejó en valores altos de densidad aparente, que se incrementaron conforme aumentó la intensidad de labranza y mayor cuando fue mecanizada.

Sin embargo se encontró mayor porcentaje de arena, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), menor porcentaje de limo, con resultados similares en el porcentaje de arcilla, y superior en la densidad aparente debido al método utilizado de (parafina) comparado con García *et al.* (2010) quienes determinaron en un perfil representativo de 0 a 35 cm, arena 13%, limo 23%, arcilla 64%, capacidad de campo 48%, punto de marchitez 33%, densidad aparente 1.0 g cm^{-3} . Ramírez-Barrientos *et al.* (2006) encontraron valores de CC que van de 47 a 75% con profundidades de 0-10, 10-20 y 20 a 30 cm, PMP de 25 a 42%.

La forma de manejo de los sistema, así como la textura, materia orgánica, y densidad aparente influyeron sobre los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, y de acuerdo a lo encontrado en el sistema convencional por su mayor porcentaje de arcilla, y materia orgánica así como menor cantidad de arena, fue 4.7% superior en capacidad de campo, retuvo más humedad, con la misma presión (ATM), reflejados en las curvas de retención de humedad aplicando el modelo de Palacios (1980), como se nota en la Figura 1, por ejemplo si consideramos 60% de humedad del suelo, para ambos manejos en el silvopastoril se requieren de 1 a 3 ATM, mientras que el convencional de 7 a 10 ATM.

Con ello se tiene que las arboles de limón del convencional cuentan con propiedades que contribuyen a un mejor ambiente para el desarrollo de raíces, y obtención de los nutrientes, pero no hay gran diferencia entre las dos formas de manejo, además al

considera el agua útil, o humedad aprovechable, en el convencional se tuvo 10.21% contra 11% del silvopastoril.

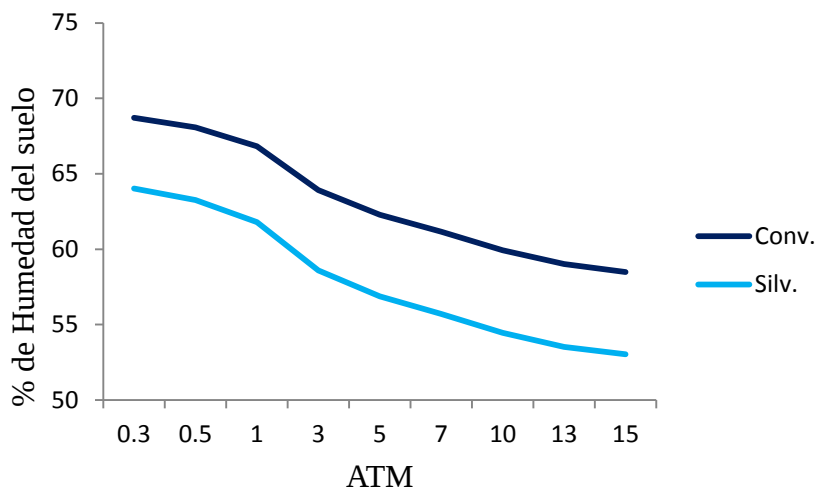


Figura 1. Curvas de retención de humedad, sistema convencional y silvopastoril.

El agua disponible para las plantas, según el concepto clásico, tiene como límite inferior el punto de marchitez permanente y como límite superior la capacidad de campo. En la actualidad este concepto es aceptado para condiciones de suelo sin degradación física, pero es cuestionado para condiciones de suelos degradados, donde la densidad aparente y resistencia aumentan, la porosidad se reduce y la distribución y tamaño de los poros se altera (Richard *et al.*, 2001). Es retenida con diferentes tensiones y cerca de un tercio de la misma no está fácil o rápidamente disponible para los cultivos, especialmente si los cultivos están transpirando intensamente. Cuanta más alta es la demanda de transpiración, debe haber más agua disponible en el suelo para evitar el estrés de agua en las plantas. En contraste, para un cultivo de transpiración lenta puede ser usada incluso el agua retenida a más altas tensiones sin causar estrés (FAO, 2005).

Gálvez *et al.* (2002) mencionan que el ganado vacuno con su peso presiona el suelo y reduce los espacios porosos, pero disminuye el número de pases de la maquinaria

agrícola en el proceso de preparación y aunque tiende a disminuir la porosidad, esta no resulta abrupta, lo que da tiempo a tomar medidas e introducir los cambios necesarios a la tecnología antes de que el suelo entre en una degradación de sus propiedades físicas.

El agua y su disponibilidad para las plantas en el suelo, así como los procesos implicados en su movimiento dependen del porcentaje de arcilla, los niveles de compactación, el tamaño y el porcentaje de poros, y el contenido de materia, orgánica, entre otros (Bescansa *et al.*, 2006).

Ospina (2003) indicó que los suelos del páramo del Sumapaz dedicados a la ganadería y a la agricultura presentan menor capacidad de almacenamiento, retención y regulación del agua, comparado con un bosque natural. Daza *et al.* (2014) encontraron que la retención de humedad fue una de las propiedades más afectadas por el cambio de uso del suelo, siendo los suelos cultivados con papa y en descanso los que presentaron menor capacidad de almacenamiento. La reducción mayor, correspondiente a agricultura intensiva, puede deberse a las actividades que se realizan de preparación excesiva del terreno a que se han visto sometidos estos suelos para la siembra del cultivo de papa. En cuanto a la humedad retenida a 1.500 kPa, es decir, el punto de marchitez permanente (Daza *et al.*, 2014).

La planeación para la operación de los sistemas de labranza requiere de información del estado de humedad en el suelo con el fin de determinar los períodos disponibles para realizar las labores con la mejor calidad y menor gasto de energía. La determinación de curvas de retención de humedad de los suelos a laborar es información fundamental en un sistema de planeación y operación de labranza. Sin embargo, en las regiones tropicales de México esta información no está disponible en la actualidad (Cadena *et al.*, 2008).

5.2 Evaluación de la fertilidad del suelo, a través de análisis químico

En el Cuadro 5 se muestran los resultados del análisis de suelo, realizado en limón mexicano, con dos tipos de manejo de cinco hectáreas cada uno, los cuales fueron clasificados de acuerdo con la técnica de análisis empleada según la NOM-021-SEMARNAT-2000. Las fechas de floración en los sistemas van de julio-agosto, y la cosecha de octubre a noviembre.

En el sistema convencional el pH fue neutro, muy bajas las concentraciones de N, Fe y Mn, bajo en materia orgánica, medio en P y B, y muy alto en K, Ca, Mg, Cu y CIC. Por su parte, en el sistema silvopastoril el pH fue neutro, muy bajas las concentraciones de N, P, Fe y Mn, bajo en materia orgánica Zn y B, alto en Cu y muy alto en K, Ca, Mg y CIC. El sistema convencional superó al silvopastoril en 12.18% de materia orgánica, 42.83% de N inorgánico, 70.19% de P, 11.95% de K, 21.01% de Ca, 1.36% de Mn, 46.63% de Zn, 36.57% de Cu, 50.81% de B, 14.24% de CIC, y fue inferior en 0.27% de pH, 8.33% de Mg, 16.33% de Fe, y 6.66% de Da. Las variables difieren debido al manejo, especies vegetales asociadas, edad de la planta, tipo de fertilización y tiempo de establecimiento.

En general, el pH óptimo de los suelos agrícolas debe variar entre 6.5 y 7.0 para obtener los mejores rendimientos y la mayor productividad (Prasad y Power, 1997). Este influye en la disponibilidad de los nutrimentos para las plantas, es decir, puede ser la causa de que se presente deficiencia, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados (Benton, 2003). Por otra parte, valores extremos del pH pueden afectar la estructura del suelo (Edward, 2000).

Mulla y McBratney (2000) señalan que la variación en las propiedades del suelo puede deberse a diferencias regionales, como son clima, topografía y material parental; sin

embargo, existen numerosas evidencias de que variaciones importantes son comunes no sólo en diferentes regiones, sino también en superficies relativamente pequeñas.

Cuadro 5. Análisis químico del suelo en sistemas de limón mexicano.

Variable	Convencional	Clasificación	Silvopastoril	Clasificación
pH	7.34	Neutro	7.36	Neutro
Materia orgánica (%)	1.97	Bajo	1.73	Bajo
N inorg (mg kg ⁻¹)	8.17	Muy bajo	4.67	Muy bajo
P (mg kg ⁻¹)	10.97	Medio	3.27	Muy bajo
K (mg kg ⁻¹)	761.58	Muy alto	670.56	Muy alto
Ca (mg kg ⁻¹)	13458.13	Muy alto	10630.00	Muy alto
Mg (mg kg ⁻¹)	3111.06	Muy alto	3394.03	Muy alto
Fe (mg kg ⁻¹)	2.56	Muy bajo	3.06	Muy bajo
Mn (mg kg ⁻¹)	2.93	Muy bajo	2.89	Muy bajo
Zn (mg kg ⁻¹)	3.86	Medio	2.06	Bajo
Cu (mg kg ⁻¹)	3.80	Muy alto	2.41	Medio
B (mg kg ⁻¹)	1.22	Alto	0.60	Bajo
CIC (Cmol kg ⁻¹)	81.83	Muy alta	70.17	Muy alta
Da (t m ⁻³)	0.98	Arcilloso	1.05	Arcilloso

Los resultados muestran algunas similitudes, a los obtenidos por Maldonado *et al.* (2001), quienes mencionan que los suelos de esta región con plantaciones de limón mexicano, presentan un pH superior a 7, son pobres en materia orgánica, con

concentraciones de medias a bajas en nitrógeno inorgánico y fósforo, altas en potasio, calcio y magnesio, y de bajas a muy bajas en hierro, manganeso, zinc y cobre.

Al analizar la fertilidad de ambos sistemas se encontró que las principales diferencias debido al manejo, se reflejan en la disponibilidad de P, Zn, Cu, y B, por encontrarse en diferente clasificación. A pesar que entre ambos sistemas el nivel de Fe es muy bajo, en el campo se observó mayor clorosis férrica en el cultivo del sistema convencional.

Con base en la densidad aparente (Da), se estimó el peso de una hectárea en cada sistema, a 30 cm de profundidad. En cuanto a la densidad aparente resultó que el suelo con sistema silvopastoril pesó 3150 toneladas, contra 2940 t ha⁻¹ del convencional, con una diferencia de 210 t ha⁻¹ entre los sistemas. Como el silvopastoril presentó menor porcentaje de materia orgánica y mayor valor de densidad aparente se determinó que el suelo está más compactado, debido quizás a la presión ejercida por las pesuñas (pisoteo) del ganado al trasladarse dentro del predio buscando el forraje, para cubrir sus necesidades alimenticias buscando el forraje.

Al analizar la cantidad de nutrimentos, en el sistema convencional se determinó 24.01 kg de N ha⁻¹, 32.26 kg de P ha⁻¹, y 2239.05 kg de K ha⁻¹, mientras que en el sistema silvopastoril se encontró 14.70, 10.29, y 2112.28 kg de N, P, K ha⁻¹ respectivamente.

La diferencia en la concentración de micronutrientes se manifiesta de acuerdo a la variación del manejo, ya que se encontró mayor concentración de hierro en el sistema silvopastoril, condición que corresponde con la menor clorosis en los limoneros.

Para el sistema convencional, ordenado de menor a mayor concentración se sitúa el boro, seguido del hierro, manganeso, cobre y zinc, en estos huertos se observó una marcada clorosis férrica y era de esperarse, ya que tan solo se dispone de 7.52 kg ha⁻¹ para abastecer la demanda de 204 árboles/ha de limón en plena producción.

Con el manejo del sistema silvopastoril por orden de menor a mayor concentración de micronutrientes se ubicó en primer lugar el boro seguido del zinc, cobre, manganeso y hierro.

La forma de manejo influye en las concentraciones nutrimentales, ya que la cantidad de N ha⁻¹ fue mayor en el sistema convencional con 9.3 kg, 21.95 kg de P y 126.77 kg de K. La mayor concentración nutrimental de éstos elementos, en el sistema convencional de producción de limón, puede atribuirse a la incorporación y descomposición de las malezas que desarrollan en los camellones, y al aporte de minerales a través de la fertilización química al suelo (2 aplicaciones antes de la floración, con sulfato de amonio y triple 17, con dosis de 2.5 kg/árbol) y tres aplicaciones foliares con guano de murciélago, a una dosis de 5 litros/ha⁻¹, y dos aplicaciones de urea 50 kg/2000 litros de agua.

Por su parte, en el sistema silvopastoril donde se tienen más componentes (limón mexicano, pasto tanzania, leucaena y bovinos) que requieren y extraen más nutrimentos del sistema, y solo son compensados a través de la fijación biológica de N y de la descomposición de la materia orgánica que proviene de la hojarasca de los árboles, herbáceas, y del estiércol de los bovinos. Además, en este sistema se encuentra una especie altamente demandante de nitrógeno por ser una gramínea (*Megathyrsus maximus*), se trata de un sistema más dinámico, donde los nutrientes disponibles rápidamente pasan por un proceso de descomposición, en formas utilizables para las plantas, más porque se trata de un sistema con producción intensiva para producir limón y forraje, empleado en la alimentación del ganado.

Las posibilidades de las leguminosas arbóreas para fijar nitrógeno atmosférico, su alto contenido proteico y la mayor rapidez en la descomposición de su materia orgánica

(MO) por la menor relación C:N, entre otras características, provocan cambios en la fertilidad del suelo que pueden lograr la sostenibilidad en pastizales tropicales y son una alternativa atractiva y viable en el trópico.

La baja concentración de Fe en los suelos de esta región es explicada, porque las formas Fe^{2+} y Fe^{3+} reaccionan formando productos de muy baja solubilidad como: ferrinohidrita $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y geotita (FeOOH) principalmente, (Loeppert *et al.*, 1984).

La baja concentración de Zn se debe a que este precipita formando compuestos amorfos de Zn, por ejemplo smithsonita (ZnCO_3), la franklinita (ZnFe_2O_4), y la zincita (ZnO), todos insolubles. La concentración de Mn disminuye porque la forma manganosa (Mn^{2+}) es oxidada por los microorganismos a Mn^{3+} o Mn^{4+} al reducirse el oxígeno para formar H_2O , generando de manera simultánea óxidos insolubles MnO_2 (McBride, 1994).

Se conocen dos mecanismos de deficiencia de Zn inducida por P, a medida que se incrementa la concentración de fósforo en el suelo, disminuye la absorción de Zn por las raíces. Se trata de inhibición de tipo no competitivo; los dos elementos son absorbidos con la mediación de distintos transportadores. Si el pH es alto (mayor a 7.0), y el catión acompañante del Zn es el Ca, ocurre precipitación del Zn en la superficie de las raíces y como consecuencia disminuye su absorción.

El pH del complejo suelo-rizosfera depende la solubilidad y la disponibilidad de P, tanto en los suelos alcalinos como en los ácidos, donde se presentan problemas de fijación de fosfatos vía adsorción química en sólidos insolubles de Ca, Fe y Al (Cruz-Flores *et al.*, 2001). Aunado a lo anterior, entre 30 y 70% del P del suelo se encuentra como éster-fosfato en la materia orgánica del suelo, en complejos cuya principal fracción aparece en derivados del ácido fítico, el cual, para ser utilizado, debe hidrolizarse por acción de enzimas fosfatasas que liberan H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} , poniéndolos así a disposición de las

plantas (Kang y Freeman, 1999). El pH de la rizósfera puede diferir del pH del suelo hasta en más de dos unidades, diferencia que está en función del suministro y la fuente de nitrógeno (NH_4^+ , NO_3^- o fijación simbiótica de N_2), el estado nutricional de la planta y la capacidad amortiguadora del suelo.

La materia orgánica mejora la concentración en fósforo y favorece el desarrollo de microorganismos que actúan sobre los fosfatos, lo que hace posible la formación de complejos arcillo-húmicos o quelatos que contribuyen a solubilizar fosfatos inorgánicos insolubles (Sanyal *et al.*, 1991).

La cantidad de materia orgánica encontrada en el sistema convencional fue de 1.97%, mientras que en el silvopastoril fue de 1.73%, valores clasificados como bajos de acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000 y comparado con lo reportado por Alonso *et al.* (2007), quienes encontraron 4% de materia orgánica. Aunque este valor supera la concentración reportada por Murray *et al.* (2011), cuyos contenidos de materia orgánica, fueron de 0.51%, con un pH de 7.0, CIC de $24.0 \text{ Cmol kg}^{-1}$, con Da de 1.4 kg dm^3 . Es notorio que el valor del pH entre los sistemas analizados y los reportados en otras investigaciones se encuentran en la misma clasificación neutral, pero se tuvo una CIC mucho mayor. También poseen menor densidad aparente, lo cual indica que han sido menos afectados por el proceso de compactación, aun con ello requiere incrementar los niveles de materia orgánica para mejorar las propiedades del suelo, con mayor retención de agua, infiltración, porosidad y nutrientes, a fin de proporcionar beneficios al cultivo de limón.

Los sistemas evaluados para la variable de capacidad de intercambio catiónico (CIC) difieren en $11.66 \text{ Cmol kg}^{-1}$, se determinó mayor valor para el sistema convencional, sin embargo, ambos suelos poseen capacidad para retener cationes, debido a sus cargas

negativas altas disponibles sobre las partículas del suelo, y es un buen indicador para conocer el potencial de retener o intercambiar nutrientes vegetales.

Como la cantidad de materia orgánica del sistema convencional y silvopastoril es baja, la mayor retención se le atribuye a las arcillas.

La CIC permite la floculación de coloides, proceso necesario en la agregación de partículas minerales y orgánicas, retención y almacenamiento de agua, reserva de nutrientes, y reduce la pérdida de cationes por lixiviado, también confiere capacidad buffer a los suelos. El análisis de las tendencias de la CIC, la materia orgánica y la arcilla, indica la fuerte dependencia que tiene la fracción mineral en las características adsorbentes de estos suelos, ya que aunque la CIC tiene poca variación, tiende a aumentar con la profundidad, al igual que la arcilla; mientras que la materia orgánica tiende a decrecer.

De acuerdo con Molina (2000), las sustancias orgánicas que se incorporan, además de propiciar el movimiento de aire, agua y nutrimentos, permiten incrementar el crecimiento, la penetración radical y las propiedades biológicas, favoreciendo la proliferación de microorganismos benéficos; todo el conjunto de las condiciones mejoradas puede dar lugar a que el propio cultivo produzca mayor cantidad de residuos, siendo otra fuente de material orgánico del suelo.

Bugarín *et al.* (2010) encontraron en un sistema silvopastoril una concentración de materia orgánica de 1.68%, evidencia el uso intenso al que el suelo ha estado sometido por muchos años, sin la incorporación de hojarasca o algún cultivo de cobertura, que supliera los nutrientes extraídos por la agricultura.

Los sistemas silvopastoriles que presentan alta densidad de especies forrajeras, modifican rápidamente la densidad del suelo, el pH y a un corto plazo la concentración

de materia orgánica. La variación en la magnitud de esos cambios está influida por la edad del sistema, las especies implantadas y el manejo, los cambios más característicos se aprecian en sistemas que tienen más tiempo de establecidos. Al respecto Murray *et al.* (2011) mencionan que los valores de D_a de 1.06 t m^{-3} después de seis años se pueden considerar bajos, coincidiendo con lo reportado por Gallardo *et al.* (1980), quienes afirman que los valores usuales de D_a de los suelos agroforestales son generalmente inferiores a los suelos agrícolas. La densidad aparente está influenciada por el contenido de las diferentes fracciones orgánicas y minerales del suelo, incluyendo el espacio ocupado por el aire, por lo que sus mediciones están relacionadas con la porosidad y por la estructura del suelo. No obstante, las concentraciones de materia orgánica del suelo debe ser el factor con mayor peso para explicar, la variabilidad hallada en la densidad aparente. En estudios realizados por Noguera y Vélez (2011) encontraron que la densidad aparente fue diferente entre usos de suelos ($P < 0,05$), siendo más alta en el tratamiento donde fue plantado *Pennisetum clandestinum*, con un valor de 1.17 g cm^{-3} , mientras que el tratamiento con bosque se presentó un promedio 0.48 g cm^{-3} , siendo éste el que mostró el valor más bajo. Este comportamiento, se debió a la presión ejercida por las pesuñas de los animales durante su traslado, lo que provoco una reducción en el volumen de macroporos del suelo (Pezo e Ibrahim, 1998).

González y Nogues (2012), atribuyen que el pisoteo excesivo por los animales en pastoreo, el uso de maquinaria pesada y las perturbaciones cuando los suelos están húmedos, aumentan la densidad aparente a valores mayores de 1.0 g cm^{-3}).



Figura 2. Muestreo de suelo en el sistema silvopastoril.



Figura 3. Muestreo foliar, quinta hoja fotosintéticamente activa.

5.3 Diagnóstico del estado nutrimental de limón mexicano

5.3.1 Índice de balance Kenworthy

En el Cuadro 6 se muestran las concentraciones nutrimentales foliares, de los análisis realizados en plantaciones de (*Citrus aurantifolia*) bajo sistema convencional y silvopastoril.

Los resultados obtenidos indicaron que en el sistema convencional se encuentra una mayor concentración de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, B y menor concentración de N y P.

Cuadro 6. Balance nutrimental foliar de *Citrus aurantifolia*, mediante índice Kenworthy

Sistema		N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
		----- % -----				-----mg kg ⁻¹ -----					
Conven- cional	C ^z	6.23	0.12	2.28	4.18	0.37	35.03	33.23	19.63	9.67	129.3
	IB ^y	199	66	134	92	84	67	76	79	92	174
	ORN ^x	P>Fe>Mn>Zn>Mg>Ca=Cu>K>B>N									
Silvo- pastoril	C	7.26	0.14	2.27	3.90	0.35	25.6	23.03	12.03	5.3	84.12
	IB	229	74	134	87	81	62	65	58	66	122
	ORN	Zn>Fe>Mn>Cu>P>Mg>Ca>B>K>N									

^zC: Concentración nutrimental; ^yIB: Índice de balance; ^xORN: Orden de Requerimiento Nutrimental.

Los mayores porcentajes de N foliar del sistema silvopastoril podrían deberse a que existen aportes de excretas por los bovinos, además a una posible fertilización foliar y al N obtenido por la fijación de la *Leucaena leucocephala*, aumentando los niveles en las plantas de limón asociado en este sistema.

De acuerdo con el índice Kenworthy, el orden de requerimiento nutrimental, para el sistema convencional mostro que el P, Fe, Mn y Zn están abajo del normal, Mg, Ca y Cu se encuentran en lo normal u óptimo, mientras que K arriba de lo normal, pero hubo un exceso de boro y nitrógeno.

En el sistema silvopastoril los nutrientes ubicados abajo de lo normal son el Zn, Fe, Mn, Cu, P, Mg, mientras que solo Ca está en concentración normal. Por su parte, B y K se ubicaron arriba de lo normal y se observó un exceso de N. Este orden de requerimiento que corresponde, tiene relación con el análisis de suelo.

Las deficiencias nutrimentales traen una serie de problemas en las plantas, mismas que repercuten en el rendimiento y calidad de la fruta, cada nutriente posee una función específica y no puede ser suplida por algún otro, es necesario que las concentraciones se encuentren en el óptimo, y esto se logra a través de análisis químico, tanto del suelo como de la planta, un cultivo al que se le suministran los elementos que demanda en la cantidad específica, logra expresar su potencial y es más resistente a las condiciones ambientales, plagas o enfermedades. La localización del síntoma de deficiencia tiene relación con la movilidad de los nutrimentos en cantidad e intensidad del estrato de mantenimiento (hojas viejas o enfermas), al estrato de síntesis (hojas jóvenes, superiores, flores o frutos).

Las plantas al verse limitadas en nutrientes, hacen crecer sus raíces muy rápidamente para absorber todos los nutrientes que tengan más cerca, aunque eventualmente su desarrollo será mínimo. La deficiencia de fósforo es uno de los problemas más comunes, los suelos por lo general contienen suficiente cantidad de fósforo, pero pueden no estar en las formas iónicas solubles en agua H_2PO_4^- o HPO_4^- . Una planta con deficiencia de fósforo puede tener las hojas verdes, pero su tasa de crecimiento es reducida y su desarrollo nuevo es frágil en el envés de las hojas (Alexander *et al.*, 1992).

El fósforo es requerido para almacenar y transformar energía; utilizado en la fotosíntesis, transporte de electrones, regulación de algunas enzimas y transporte de carbohidratos. La bioquímica de carbohidratos y el transporte de éstos son particularmente afectados cuando hay deficiencia de fósforo.

Un mecanismo por medio del cual las plantas extraen el fósforo es a través del dióxido de carbono desprendido por las raíces, el cual al reaccionar con el agua forma el ácido carbónico, siendo una fuente de iones H^+ , que acidifican el medio, este proceso favorece

la disolución de los fosfatos insolubles en el suelo (Ascencio y Lazo, 2001). Por eso al exponer a condiciones externas idénticas pueden comportarse de manera diferente evidenciando procesos localizados de alcalinización y acidificación (Hinsinger, 1998).

Otra deficiencia nutrimental es la clorosis férrica, ampliamente marcada en arboles del sistema convencional, se presenta en hojas jóvenes mostrando clorosis pero con las nervaduras verdes como se nota en la Figura 4 y esta no radica en la ausencia de este micronutriente en el suelo, ya que se considera al hierro (Fe) como el cuarto elemento más abundante en las rocas de la tierra, con gran capacidad de formar numerosos compuestos estables con S, O y Si.

La clorosis férrica se produce por disminuciones en la disponibilidad de hierro activo en la planta, desencadenada por la interacción de factores químicos, físicos y biológicos presentes tanto en el suelo como dentro de la misma especie vegetal (Marschner, 1995).

Dentro de la planta, el principal factor asociado con la clorosis férrica bajo condiciones de suelos calcáreos parece ser el efecto del ión bicarbonato sobre la absorción y el transporte del hierro (Chouliaras *et al.*, 2004), dando como resultado la desactivación o inmovilización del hierro dentro de la planta (Obreza *et al.*, 1993).

Lee *et al.* (1998) menciona que al aplicar ácido sulfúrico comercial en dosis bajas, solo y/o con Fe, Zn, o Mn en el agua de riego, puede ser usado en suelos calcáreos para corregir deficiencias, sin serios problemas en su manejo, resultando más económico y técnicamente más eficiente que las aplicaciones de 1800 kg ha⁻¹ directas al suelo.



Figura 4. Clorosis férrica foliar en limón mexicano del sistema convencional.

En situaciones en que existe carencia de hierro en el medio, las plantas superiores han desarrollado una serie de mecanismos para aumentar la disponibilidad del Fe en el suelo. Dichas plantas se dividen en dos grupos dependiendo del modelo de respuesta que desarrollen bajo este déficit, plantas de estrategia I y II (Hopkins *et al.*, 1992).

La estrategia I, con sus subestrategias, la presentan las monocotiledóneas y dicotiledóneas, excepto las gramíneas. La subestrategia 1, consiste en un aumento de la actividad de una reductasa unida a la membrana plasmática de la rizodermis, responsable de la reducción del Fe^{3+} , lo que da lugar a un aumento de la velocidad de descomposición de los quelatos Fe^{3+} y consiguiente toma del hierro reducido por la planta. Se trata de una enzima transmembrana (reductasa de quelatos férricos), capaz de reducir el Fe con electrones provenientes del NADPH citoplasmático (Rombolá *et al.*, 2002).

La subestrategia dos, consiste en la expulsión de H^+ por las raíces a la rizósfera, esta subestrategia es menos frecuente y solo la presentan algunas dicotiledóneas (Toulon *et al.*, 1992). Aunque la bomba redox transmembrana, puede contribuir a la excreción neta

de protones, el fuerte aumento en esta excreción, con deficiencia de hierro es más probable que se deba a una mayor actividad de la bomba de expulsión de protones de la membrana plasmática (ATPasa) que a la reductasa.

La acidificación de la rizósfera, además de contribuir a la solubilización del Fe del suelo, mejora la actividad de la reductasa, la cual se ve muy estimulada por el pH bajo, y mejora la afinidad del sustrato de dicha reductasa, lo que puede atribuirse a una neutralización de la carga negativa de las superficies celulares y por tanto impedir la repulsión de los quelatos de hierro, cargados negativamente por los lugares de reducción (Schmidt, 2006).

La liberación de hidrógenos va unida a cambios morfológicos en las raíces de las plantas, como el incremento de raíces laterales, pelos radicales y células de transferencia (López-Millán *et al.*, 2001).

La principal carencia de hierro en hojas se produce en los cloroplastos que ven alterada su estructura y funciones. Se reduce el número de tilacoides y granas y se altera la estructura del tilacoide. La reducción de la membrana del tilacoide va acompañada de una disminución de todos los pigmentos que recogen la luz: clorofilas a y b, y carotenos, si bien los carotenos disminuyen en menor proporción que las clorofilas y este desequilibrio trae el característico color amarillo de las hojas cloróticas. También se ve reducido el transporte fotosintético de electrones; el hierro es un constituyente de los muchos transportadores de electrones (Donnini *et al.*, 2003).

Estos hechos conducen a una reducción en la capacidad fotosintética de la planta, que se traduce en una disminución de azúcares, almidón, algunos aminoácidos y acumulación de otros, con la alteración en la síntesis de proteínas.

El descenso en la concentración de clorofila está asociado con la disminución de proteínas, ya que ambas se unen mediante un enlace no covalente, para formar un complejo pigmento-proteínico que constituye la membrana de los tilacoides (Fodor *et al.*, 1995).

Al igual que en las raíces, en las hojas y sabia del xilema se acumulan ácidos orgánicos, principalmente citrato y malato, y se incrementa la actividad de PEPC y de distintas enzimas del ciclo de los ácidos tricarboxílicos, como malato deshidrogenasa, aconitasa, fumarasa, citrato sintetasa (López-Millán *et al.*, 2001).

Cuando el estrés es severo, se detiene la división celular en los meristemos y se inhibe la producción de primordios foliares en los ápices del brote y con ello el crecimiento foliar (Römheld y Maschner, 1991).

En diversas investigaciones relativas a parámetros fisiológicos en hojas Fe-deficientes se menciona que aún es escasa la información referente a los cambios que ocurren tanto en la estructura interna como en la superficie de las hojas afectadas por este estrés abiótico (Fernández *et al.*, 2008). Dichos cambios pueden ser típicos de cada especie de cultivo, en hojas de limón mexicano deficientes en Fe, en los cloroplastos los tilacoides se apilan de manera desordenada, con escaso desarrollo del grana; además, se afecta el grosor de los parénquimas de empalizada y esponjoso por cambios en las dimensiones de las células (Maldonado-Torres *et al.*, 2006). Hojas de pera y durazno Fe-deficientes no muestran cambios aparentes en cuanto al grosor, pero disminuye el tamaño y el peso de materia fresca y el diámetro promedio de los poros estomatales, sin afectar la densidad estomatal (Fernández *et al.*, 2008).

Zavala *et al.* (2011) estudiaron los cambios morfológicos y fisiológicos en hojas de frijol tolerante y susceptible a deficiencias de hierro, encontraron que la estructura del

mesófilo de la hoja clorótica del genotipo tolerante se mostró organizada pero con el parénquima esponjoso más compacto que en la hoja verde y con escasos cloroplastos y de menor tamaño. En la hoja clorótica del genotipo susceptible, el mesófilo presentó estructura desorganizada, con células de forma y tamaño irregular y, con aparente ausencia de cloroplastos. En hojas cloróticas de ambas líneas, el desarrollo de los tilacoides fue escaso y sin formación de grana. En cualquier condición de suministro de Fe y pH del medio, la línea de frijol tolerante presentó lecturas SPAD y fotosíntesis neta más alta que la línea susceptible.

La Figura 5 presenta una asociación de disposición de especies en el sistema silvopastoril, maximizando el tiempo y espacio. Se aprecia que el estrato dominante son los árboles de limón, seguido por *Leucaena* la cual en su mayoría es continuamente podada dejando algunos árboles para producir semilla y repoblar las áreas dañadas, finalmente el estrato bajo es dominado por pasto Tanzania. Se trata de una combinación ejemplar de baja competencia por recursos, porque el forraje genera alimento para bovinos, éstos a su vez producen leche y carne. Aunque este arreglo puede dificultar la cosecha de los frutos de limón, debido a la densidad de plantas y por la utilización de los espacios entre hileras del limonero. Con este sistema se puede hacer frente a los problemas de degradación de los suelos y a la pérdida de la biodiversidad agrícola en las plantaciones de cítricos, a la vez que se obtienen ingresos ganaderos, productos y servicios ambientales.

Estos servicios son tan necesarios que cada vez hay más mercados internacionales y nacionales para su compra-venta. Actualmente existen diversos programas de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) como el de la CONAFOR, el interés mundial por apoyar estas actividades está creciendo con alternativas sustentables.



Figura 5. Sistema silvopastoril con limón mexicano, leucaena y pasto tanzania.

Las leguminosas poseen la propiedad de mejorar la concentración de N del suelo a través de la fijación de este desde la atmósfera. Pueden fijar hasta 500 kg de N/ha/año, un rápido reciclaje de P y un incremento en la actividad biológica del suelo. Esto ayuda a disminuir la severa erosión en los suelos tropicales (Oberson *et al.*, 1996). Otro atributo de las leguminosas forrajeras es su calidad y disponibilidad durante la temporada de sequía, época en que los pastos reducen en un 75% su producción de biomasa.

Camacaro (2004), encontró que *Leucaena leucocephala* puede fijar 160 kg de N/ha/año, pero este proceso depende de varios factores, entre ellos de la densidad de plantas, simbiosis efectiva con las bacterias y condiciones químicas del suelo. Es claro que bajo el esquema de manejo y producción del sistema silvopastoril, es más extractivo desde el punto de vista nutrimental.

En Colombia, los sistemas silvopastoriles con más de 10,000 arbustos de *Leucaena leucocephala* permiten fijar hasta 400 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Adicional a esto, el manejo agroforestal (como la poda), aporta entre cinco y seis t ha⁻¹ año⁻¹ de residuos,

convirtiéndose finalmente, en materia orgánica (MO) para el suelo. La fijación de N, los aportes de MO y la producción de excretas del ganado, hacen que el sistema sea eficiente en el aprovechamiento y reciclaje de los propios recursos, lo cual le permite ser independiente en la utilización de insumos y productos agrícolas para la fertilización (Murgueitio *et al.*, 2007).

En cuanto al reciclaje de nutrientes se refiere, son evidentes los efectos en la transferencia de nutrientes vegetales en los potreros debido a los productos excretados por los animales. La mayor parte de estos nutrientes se retorna al pastizal en forma de heces y orina, cuya cantidad es considerable. Las excretas contienen los nutrientes necesarios para las plantas y en las proporciones deseadas aproximadamente. Sin embargo esos nutrientes no pueden estar todos inmediatamente disponibles para las raíces de las plantas. La orina es rica en N, K, y S mientras que las heces contienen todo el fósforo, parte orgánico (poco asimilable) y parte inorgánico (bastante disponible de inmediato), así también la mayoría del Ca y Mg pero mucho menos K, Na, N y S, siendo estos dos últimos disponibles solo lentamente. Teóricamente, los mismos nutrientes pueden ser usados varias veces por las plantas y animales en un período corto, mientras que puede tomar un año o más el crecimiento normal de la planta para descomponer y liberar nutrientes para la utilización por otras. El agotamiento de las reservas por debajo de un nivel crítico puede ocasionar la muerte de la planta y, por consiguiente, la cubierta basal en los pastizales sujetos a sobrepastoreo, lo que usualmente va asociado con el incremento de especies de gramíneas indeseables y malezas, también con la erosión y deterioro del suelo, (Funes, 1975).



Figura 6. Bovinos pastoreando en el sistema silvopastoril limón-leucaena-tanzania.

En México, el establecimiento de los sistemas silvopastoriles intensivos se ha iniciado con 500 ha para 50 productores en el estado de Michoacán, de donde ha partido y se han implementado 200 ha por entidad en Veracruz, Yucatán, Chiapas y Oaxaca; 300 ha en Campeche, Guerrero y Jalisco, así como 500 ha en Tamaulipas y San Luis Potosí.

Sin embargo, para la implementación exitosa de los SSPi existen otros factores que se deben de considerar, como son: el riesgo, incertidumbre en los mercados y la pobre genética de los animales. Ha sido demostrado que los productores no cambian rápidamente de un sistema tradicional familiar, más seguro y experimentado, a una nueva tecnología que pueda estar asociada con riesgos más altos que los métodos tradicionales (Ibrahim *et al.*, 2007).

Un factor importante que debe mencionarse, es que *Leucaena leucocephala* ha sido fundamental en la generación de estos sistemas, la cual también ha sido tema de

controversias. Esta leguminosa posee metabolitos secundarios como la mimosina, misma que ha sido relacionada con problemas de toxicidad. Sin embargo, en animales adaptados y acostumbrados a consumir esta planta, como ocurre en varias regiones de México, Colombia y Cuba, no presentan síntomas adversos. Lo anterior se debe a la presencia de microorganismos ruminales que pueden degradar la mimosina en compuestos útiles para el animal (Dalzell *et al.*, 2006).

Por otra parte, cabe mencionar que la asociación de altas densidades de *L. leucocephala* puede tener influencia en la proporción de luz, afectando la producción de biomasa de la misma leguminosa y del pasto asociado; sin embargo, se ha demostrado que *L. leucocephala* es capaz de tener adaptación a los rayos solares con respecto al tiempo y fotomodulación de su follaje (Anguiano *et al.*, 2012).

Respecto al pasto, es recomendable establecer uno que presente tolerancia hacia ciertas condiciones de sombreado, dentro del cual destacan especies de los géneros *Panicum* y *Brachiaria*, así como el pasto Cuba CT-115 (*Panicum purpureum*). No obstante, es necesario considerar diversas prácticas agronómicas como la poda, usada como una estrategia para incrementar la producción de biomasa en la leguminosa y la gramínea (Bacab *et al.*, 2012). Las plantaciones donde hay árboles maderables, frutales y ganado son más rentables. Por una parte, el ganado proporciona a los árboles mucho del nitrógeno que necesitan (mediante el excremento y la orina) y controlan las malezas. Con alimentos de alto valor nutritivo suscitamos mejores niveles de producción, buenas ganancias en peso y una mayor producción de leche (asegurando una buena condición para las vacas con cría). Las especies arbóreas forrajeras producen follaje y/o frutos con alto valor nutritivo; altos contenidos de energía (calorías) y proteína cruda (PC = 14 - 25%) y son de buena digestibilidad 55 - 80% (CONAFOR, 2010).

5.3.2 Desviación Óptima Porcentual (DOP)

Los resultados de las concentraciones foliares, fueron analizadas mediante el procedimiento de interpretación conocido como, Desviación Óptima Porcentual (DOP) que considera valores de referencia o estándar que son comparados con los valores de la muestra para estimar el comportamiento nutrimental.

De acuerdo a los resultados presentados en los Cuadros 7 y 8, la mayoría de las deficiencias corresponden a micronutrientes, por lo que la baja concentración de estos afectara muchas funciones metabólicas en las plantas.

Los valores absolutos (SDOP) indican la gravedad del problema en los limoneros, las deficiencias o excesos de nutrientes afectan la nutrición del cultivo y en consecuencia el rendimiento del fruto, esto trae sinergismos y antagonismos, condiciones que limitan la disponibilidad y absorción de nutrimentos.

Los resultados obtenidos en el análisis de suelo mostraron coincidencia con los foliares, ya que los nutrimentos deficientes en éste, también se ubican en un nivel deficitario en los árboles de limón.

Los elementos P, Fe, Mn y Zn estuvieron deficientes tanto en suelo como en el tejido, mientras que el N, K y B mostraron un exceso al ser interpretado mediante la DOP. Es claro el exceso de K foliar debida a la alta concentración en el suelo, pero el caso de N al encontrarse en exceso en las hojas puede estar muy relacionado con aplicaciones foliares de éste.

Cuadro 7. Desviación óptima porcentual del análisis foliar de limón mexicano en el sistema convencional.

Índice	Muestra	Óptimo	DOP	SDOP	Clasificación
N	6.23	2.8	122.5	122.5	Exceso
P	0.12	0.21	-42.86	42.86	Deficiente
K	2.28	1.57	45.22	45.22	Exceso
Ca	4.18	4.72	-11.44	11.44	Deficiente
Mg	0.37	0.49	-24.49	24.49	Deficiente
Fe	35.03	88	-60.19	60.19	Deficiente
Mn	33.23	55	-39.58	39.58	Deficiente
Zn	19.63	27	-27.30	27.30	Deficiente
Cu	9.67	11	-12.09	12.09	Deficiente
B	129.32	64	102.06	102.6	Exceso

La Figura 7 muestra el orden de requerimiento nutricional (ORN), presentado en el sistema convencional, donde en el cultivo se aprecia una clorosis generalizada y hojas pequeñas, mismas que afectan el proceso fotosintético y el funcionamiento metabólico, además repercute en la cantidad y calidad de los frutos. La huerta con manejo convencional mostró una marcada deficiencia de hierro y este se ubica como el de mayor requerimiento, seguido de otros nutrimentos. De acuerdo a la DOP los elementos más deficientes en orden de importancia fueron Fe>P>Mn>Zn>Mg>Cu>Ca, mientras que K>B>N se ubicaron en un nivel de exceso.

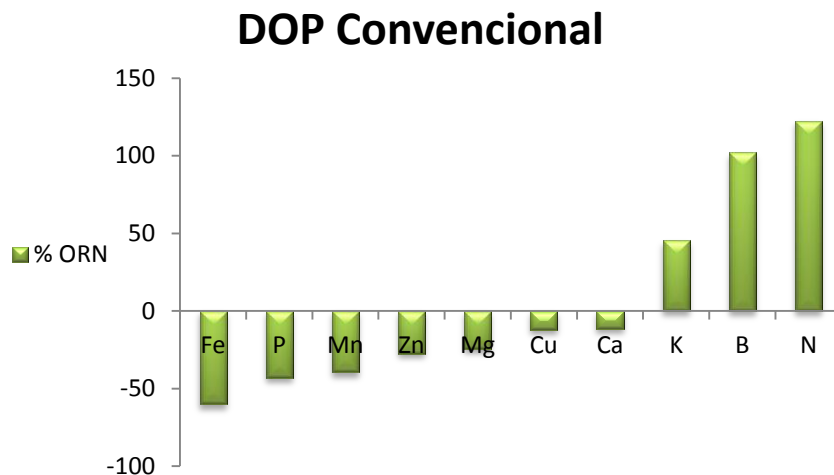


Figura 7. Orden de déficit y exceso nutrimental del sistema convencional.

La Figura 8 muestra la forma de cultivo convencional, donde las malezas se controlan por medio manual mediante chapeos, cortando y dejándola en el suelo para que se incorpore como materia orgánica, problema que en el otro sistema es controlado principalmente por el ganado bovino.



Figura 8. Limón mexicano desarrollado en el sistema convencional.

Las hierbas crecen aprovechando la radiación, humedad y nutrientes derivados de la materia orgánica descompuesta. En los espacios libres de camellones se favorece la cosecha, sin embargo el ambiente es más caluroso.

La fertilización de frutales está basada principalmente en fuentes con N, P y K dejando fuera a los micronutrientes, sin considerar la importancia de las funciones que realizan. Sin embargo, los micronutrientes son requeridos en la nutrición de limón mexicano, para alcanzar buenos rendimientos, y así superar al promedio nacional y convertir a la citricultura en una actividad productiva.

Estos sistemas se enfrentan a diversos problemas, entre ellos la gomosis o pudrición del pie de los cítricos, la cual, ha sido una de las enfermedades más importantes debido a que anualmente produce la muerte de 3 a 5% de árboles de cítricos de pie franco e injertado (Medina *et al.*, 2001).

El manejo sustentable de esta enfermedad, se había logrado empleando patrones resistentes, como ha sido el naranjo agrio (*Citrus aurantium*). Sin embargo, la alta susceptibilidad de este patrón al virus de la tristeza de los cítricos (VTC), ha inducido a nivel mundial su inminente reemplazo. La selección de nuevos patrones como *Troyer*, *Volkameriana*, *Swingle*, *Cleopatra*, con resistencia al VTC, ha permitido continuar con la actividad citrícola de Estados Unidos y Europa (Rocha-Peña, 1995).

El control de malas hierbas es necesario en todas las plantaciones de frutales, incluidos los cítricos. El objetivo de los programas de control de malas hierbas, en cítricos, es impedir o reducir la competencia de aquellas, mejorando o facilitando, las prácticas culturales, como el riego y la recolección, en consecuencia se aumentan el rendimiento y la calidad de los frutos.

Los métodos para controlar la maleza dependen, entre otros factores, de la topografía del terreno y de los recursos que disponga el productor. En terrenos planos o con pendientes moderadas se puede utilizar el control mecánico, químico o la combinación de ambos.

Si se controla mecánicamente es importante que la rastra no profundice más allá de los 10 centímetros, ya que el limón tiene una raíz superficial que se desarrolla entre los 10 y 30 centímetros.

El consumo de agua por los árboles de limón, depende de varios factores como la temperatura, textura y estructura del suelo, topografía y de factores relacionados con el árbol, como son: tamaño, profundidad de las raíces, patrón y densidad de plantación.

Contreras *et al.* (2008) encontraron en un estudio con limón persa en dos tipos de suelo (arenoso y arcilloso) que la mayor cantidad de raíces se presentó, para ambos tipos de suelo, en el estrato de 0-30 cm de profundidad decreciendo hacia los estratos más profundos. Se observó la tendencia en el número de raíces, a descender conforme se incrementa la distancia desde el tronco.

De aquí la importancia por conocer, cómo se distribuyen las raíces, para no dañarlas con el laboreo mecánico o manual, y en su caso hacer la fertilización en el sitio de mayor volumen radicular, para facilitar la absorción de nutrientes, también se manifiesta que puede haber competencia por agua y nutrientes con otras plantas, principalmente malezas, debido a que la mayoría de raíces de limón están cercanas a la capa superficial. Bryla *et al.* (2001) determinaron que la mayoría de las raíces finas están distribuidas cerca de la superficie del suelo. Vieira *et al.* (2004) correlacionando la cantidad de raíces y la distancia desde el tronco, en portainjertos para limón persa en suelo arcilloso, justifican la fertilización y encalado al colocar 2/3 del fertilizante en banda dentro de la proyección de la copa y 1/3 fuera de la misma, ya que ahí se ubica la mayor cantidad de raíces.

Pérez y Orozco (2004) aplicaron dosis de 0 a 2.7, de 0 a 1.675 y de 0 a 1.675 kg árbol⁻¹ de N, P y K, respectivamente. El rendimiento de fruto se incrementó únicamente con N

(1.2 a 2.7 kg árbol⁻¹); La máxima concentración foliar de N se obtuvo con 2.4 kg N árbol⁻¹ y no se observó respuesta del P ni K sobre el rendimiento ni sobre el estado nutricional del árbol.

Las dosis de fertilización dieran de un lugar a otro, sin embargo, estas dan referencia de cuanto aplicar, a lo que Curti *et al.* (2000) han propuesto, para el limón Persa aplicar anualmente 1500 g de N + 500 g de P + 750 g de K por árbol en la zona norte de Veracruz. Al respecto Maldonado (1999) indica que se debe aplicar lo que el árbol requiera en función del suelo en donde se encuentre, la edad del árbol, niveles productivos, etc., y no un exceso que, además de implicar un gasto adicional, puede contaminar acuíferos (Maldonado, 1999).

Para generar una dosis de fertilización adecuada, es necesario considerar la demanda nutrimental del cultivo, la eficiencia del fertilizante y la cantidad de nutrimentos disponible en el suelo (Etchevers, 1987).

En un estudio sobre el efecto de las labores culturales en la producción y calidad de limón mexicano de invierno, mencionan que la aplicación foliar de urea al 1% en el testigo absoluto indujo un aumento del 600% en la cantidad de flores, pero no el rendimiento. Las prácticas de anillado, estrés hídrico, poda y raleo de frutos promovieron ganancias de 500 a 1000% en la producción invernal de frutos. Sin embargo el anillado y estrés hídrico puede dañar a los árboles. El anillado mejoró la calidad de los frutos en peso, diámetro y en la relación azúcares/acidez, pero redujo el índice de color y firmeza de la pulpa (Ariza *et al.*, 2004).

Ramírez *et al.* (2008) mencionan que al analizar huertos de limón en los estados de Oaxaca y Guerrero, a través del ingreso, el cual se compone del consumo intermedio y valor agregado, al efectuarse específicamente la indagación del consumo intermedio

(fertilizantes, fungicidas, herbicidas, insecticidas, semilla o planta, diesel, servicios contratados) insumos indirectamente comerciables como son tractor e implementos utilizados en las labores de las huertas. En este sentido se obtuvo que el estado de Oaxaca y Guerrero gastan en promedio por hectárea 9909 y 1463 pesos que representan el 28.8 y 14.2% de los ingresos totales obtenidos en la producción de la fruta. Esto confirma que los productores en el estado de Guerrero invierten muy poco en el mantenimiento que deben tener las huertas de limón, lo que lleva consigo menores rendimientos por hectárea que se refleja en los niveles de rentabilidad de la actividad productiva.

En el Cuadro 8 muestra como el sistema silvopastoril a pesar de las ventajas ambientales que ofrece con la asociación de especies y reciclaje de nutrientes por aporte de materia orgánica, presenta problemas nutricionales con un 70% de deficiencias, además de P, Ca, Mg, requiere micronutrientes. Existe desbalance nutrimental que afecta el rendimiento y calidad del limón.

Los diferentes nutrimentos raramente están presentes en los suelos en cantidades adecuadas, por lo que deben ser suministrados mediante materiales fertilizantes y residuos orgánicos. Cuando algún nutrimento no está presente en la cantidad suficiente, el frutal es afectado; las deficiencias severas de algún nutrimento resultan en síntomas característicos que son exhibidos por las hojas u otros órganos tal como los frutos, síntomas que usualmente persisten hasta que la deficiencia es corregida. Incluso, es frecuente que dos o tres elementos sean deficientes en grado variable de manera simultánea, y los síntomas resultantes no permiten reconocerlos fácilmente.

De aquí la importancia a destacar, que un elemento mineral esencial, es aquel que cumple con los requisitos siguientes: no puede ser sustituido por otro, se le ha

identificado un papel bioquímico específico, y es necesario para que la planta cumpla con su ciclo de vida.

Cuadro 8. Desviación óptima porcentual del análisis foliar de limón mexicano en el sistema silvopastoril.

Índice	Muestra	Optimo	DOP	SDOP	Clasificación
N	7.26	2.8	159.29	159.29	Exceso
P	0.14	0.21	-33.33	33.33	Deficiente
K	2.27	1.57	44.59	44.59	Exceso
Ca	3.9	4.72	-17.37	17.37	Deficiente
Mg	0.35	0.49	-28.57	28.57	Deficiente
Fe	25.6	88	-70.91	70.91	Deficiente
Mn	23.03	55	-58.13	58.13	Deficiente
Zn	12.03	27	-55.44	55.44	Deficiente
Cu	5.3	11	-51.82	51.82	Deficiente
B	84.12	64	31.44	31.44	Exceso

Es importante mencionar, además, que los nutrimentos deben estar presentes en forma balanceada, así como en ciertas cantidades mínimas.

La Figura 9 da a conocer el orden de requerimiento nutrimental del sistema silvopastoril: Fe>Mn>Zn>Cu>P>Mg>Ca, con excesos de N, K y B. Son los mismos nutrientes deficientes que en el sistema convencional, lo que difiere es el orden de cada uno de ellos, coincidiendo solo con el Fe y Ca.

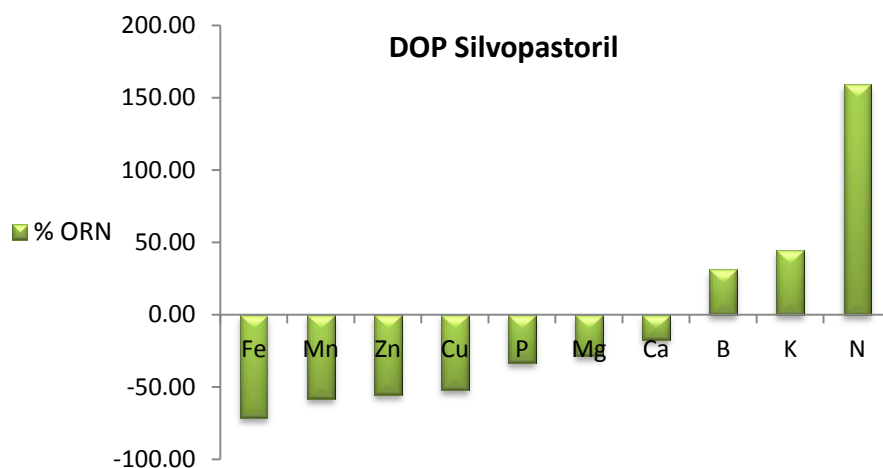


Figura 9. Orden de déficit y exceso nutrimental del sistema silvopastoril.

5.4 Frutos de limón mexicano

5.4.1 Análisis de nutrientes en los frutos

Los resultados nutrimentales de los frutos de limón del Cuadro 9, indican que en el sistema convencional se encuentra las mayores concentraciones de N, P, Ca, Fe y Cu, mientras que el sistema silvopastoril presentó mayor concentración de K, Mg, Mn, Zn y B.

Los datos muestran un patrón distinto en las concentraciones de nutrimentales de las hojas y los frutos, mostro mayor concentración de nitrógeno en las hojas pero con niveles similares de fósforo, y mayor cantidad de hierro en la cascara de los frutos.

Cuadro 9. Análisis de nutrientes en el fruto de limón.

Sistemas	N	P	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Fe ⁺²⁺³	Mn ⁺²	Zn ⁺²	Cu ⁺²	B
	----- % -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
Convencional	3.00	0.12	1.99	1.02	0.19	60.1	4.0	7.2	3.95	11.05
Silvopastoril	2.25	0.11	2.10	0.70	0.20	48.3	7.1	8.2	2.43	16.55

El orden extracción de nutrientes en ambos sistemas de producción, en los frutos de limón mexicano fue, en macronutrientes de mayor a menor orden, N, K, Ca, Mg, P, en cuanto a los micronutrientes se presentó Fe, seguido de B, Zn, Mn y Cu.

Maldonado *et al.* (2001) encontraron que el limón mexicano extrajo en mayor medida macronutrientes, más K que cualquier otro nutriente, seguido de N, Ca, P y Mg, los micronutrientes, extrajo en mayor medida Fe, seguido de B, Zn, Cu y Mn.

Al comparar los resultados, con los del sistema, el orden de extracción fue similar para Ca, Fe, B y Zn, y en general los cítricos presentan el siguiente orden de extracción de micronutrientes: Fe, Zn, Mn y Cu (Chapman, 1968; Malavolta *et al.*, 1989).

Maldonado *et al.* (2001) mencionan que por cada tonelada de fruta de limón, se extraen 1.86 kg de N, 0.662 kg de P_2O_5 , 2.728 kg de K_2O , 1.169 kg de CaO, 0.164 kg de MgO, 3.41 g de Fe, 1.31 g de Mn, 1.74 g de Zn, 1.44 g de Cu, 3.30 de B y los bajos rendimientos promedio de 15 t ha^{-1} de limón mexicano se deben al desbalance nutrimental que presentan la mayoría de los huertos en el valle de Apatzingán.

Para los cítricos las cantidades de N y K absorbidos se incrementan de manera continua y constante hasta el periodo de maduración, lo que indica que estos nutrimentos son requeridos durante todo el periodo de crecimiento del fruto. El P y Mg son requeridos en mayor proporción durante el primer periodo de crecimiento del fruto, siendo luego constante hasta la maduración. El Ca es requerido durante la primera y tercera etapa de crecimiento del fruto, es decir durante la etapa de formación del fruto “cerillo” y en la formación de semillas y madurez fisiológica (Cohen, 1976).

5.4.2 Análisis de las principales variables en los frutos

El Cuadro 10 muestra las variables determinadas en los frutos de limón, en estas mediciones es notorio, como los frutos del sistema silvopastoril son de tamaño superior en comparación con los del convencional.

El sistema silvopastoril supero al convencional en 6.06% de diámetro ecuatorial, 1.17% de grados Brix, 21.05% de jugo en mL, 15.40% de peso, 22.03% de gramos de jugo, 14.84% de peso fresco de la cáscara y 13.20% de peso seco de cáscara, y tuvo 1.37% menos de pH, ligeramente más ácido.

Cuadro 10. Variables medidas en fruto de limón.

Sistemas	D. E ^z cm	° Brix	Jugo ml	pH	Peso -----g fruto-----	Jugo	C. F ^y	C. S ^x
Convencional	4.03	7.59	15.45	2.18	39.33	15.39	22.09	4.01
Silvopastoril	4.29	7.68	19.57	2.15	46.49	19.74	25.94	4.62
ΔPorcentaje	6.4	1.2	26.7	1.38	18.2	28.2	17.4	15.2

^zD.E: Diámetro ecuatorial, ^yC.F: cascara fresca, ^xC.F: cascara seca, cada una de las variables corresponden a los promedios de las muestras.

De acuerdo a la clasificación (PC-024, 2005) las cualidades de los frutos se encuentran en el código 5, se tienen frutos de calidad en milímetros y en unidades de producto por kilogramo, para ambos sistemas de producción, el convencional presenta frutos de buen tamaño estos contienen el 39.13% de jugo, mientras que el silvopastoril, presentó un 42.46% de jugo, indudablemente es de mejor calidad, por ello es importante que los limones cumplan con el peso, tamaño y cantidad de jugo, de lo contrario la calidad se ve afectada, los sistemas en promedio mostraron que por cada kilogramo de limón el 59.20% es bagazo.

Las características sobresalientes en la calidad de los frutos del sistema silvopastoril, se debe a que a pesar de que existe concentración de nutrientes más bajas en el suelo, estos son utilizados para una menor cantidad de frutos y por ello presentaron mejores características en comparación con los frutos del convencional.

En ambos sistemas las características de los frutos por su diámetro y peso superan a los encontrados por Pérez (2002) quien evaluó el efecto de diferentes mejoradores del suelo, pero no así en el porcentaje de jugo por fruto, ya que encontró frutos de 34.8 gramos, y estos contienen el 47.02% de jugo, con 28.73 frutos por kilogramo, lo que representa 470.02 gramos de jugo por kilogramo de limón, mientras que el sistema convencional presento 25.42 limones por kilogramo, y cada limón en promedio peso 39.33 gramos, con el 39.13% de jugo, 391.3 gramos de jugo por kilogramo de limón, en el sistema silvopastoril se encontraron frutos de 46.49 gramos, y 21.51 limones conforman un kilogramo, y estos contienen el 42.46% de jugo, o 424.60 gramos de jugo en un kilogramo de fruto. Fue menor porcentaje de jugo tanto en el sistema convencional y silvopastoril, características que se le atribuyen a las deficiencias y excesos nutricionales, y es notorio que el silvopastoril se acerca a lo reportado por lo que se convierte en una opción de producción para continuar con el cultivo de limón, siempre y cuando el rendimiento sea igual o cercano al convencional, de ser menor habría que considerar los productos que se obtienen por los bovinos.

Los grados brix en los frutos de limón (convencional y silvopastoril) se asemejan a los reportados por la literatura, como a continuación se menciona.

Noriega-Cantú *et al.* (2012) reportan, con manejo integrado convencional, 22.06 ml/fruto, 6.79 °Brix (%) y con manejo orgánico, 24.44 ml/fruto, 7 °Brix (%).

Domínguez *et al.* (2003) encontraron en frutos de limón mexicano una concentración de azúcar de 7.8 °Brix; mostrando características óptimas para su consumo en fresco de acuerdo con lo establecido por la norma NMX-FF-087-1995-SCFI.

Álvarez *et al.* (2008) reportan el efecto del tratamiento con diferentes reguladores de crecimiento en la calidad de los frutos de limón criollo, en cuanto a los °Brix, fueron desde 7.2 hasta 8.5, medidos un día después de la cosecha.

El Limón Mexicano un fruto no climatérico, no avanzará su madurez fisiológica después de haberse separado del árbol, no aumentará el contenido de jugo, de sólidos solubles (brix), de ácidos, ni variará la relación entre sus totales, ni otra característica, excepto el color. La epidermis, perderá clorofila y se manifestarán los carotenoides, si el lapso entre el empaque y el consumo es prolongado (PC-024, 2005).

Es un fruto muy perecedero, debido principalmente a que presentan flavedo=cáscara muy delgada y delicada. En su metabolismo presenta cambios relacionados con el fenómeno de senescencia, caracterizado por pérdidas en el contenido de clorofila (responsables del color verde), elevada transpiración que conduce al marchitamiento y endurecimiento de la cáscara, reacciones de fermentación (producción de etanol), pérdidas del valor nutricional y mayor sensibilidad al ataque de microorganismos causantes de pudriciones (Saucedo-Veloz, 2005). Estos cambios están asociados a diferentes condicionantes, en primer lugar al marchitamiento del flavedo y las pérdidas de color verde externo, que son los dos principales factores de deterioro que afectan significativamente la calidad del fruto en postcosecha.

Actualmente la producción de limón mexicano se basa en una variedad comercial de pie franco, producción heterogénea, con espinas y plantas bien adaptadas a las condiciones agroclimáticas de las zonas productoras del país, sin embargo el fruto que se obtiene es

muy pequeño, con alto contenido de semillas y con un manejo postcosecha difícil, situación que le resta calidad al fruto, no obstante presenta alto contenido de jugo, alta concentración de ácido cítrico y de ácido ascórbico, así como su excelente sabor y aroma.

Sin embargo por sus características de tamaño pequeño, pericarpio delgado con elevada presencia de glándulas de aceite, así como bajo contenido de ceras intra y extracuticulares, los frutos resultan altamente sensibles a pérdidas de agua por transpiración, diversos daños mecánicos como heridas, golpes, deformaciones, picaduras y rozaduras (Saucedo-Veloz, 2008; Medina-Urrutia, 2009).

5.5 Rendimiento por hectárea de limón mexicano

El Cuadro 11, muestra el rendimiento que se obtuvo de limón mexicano, cada árbol del sistema convencional en promedio produce 103.8 kg, o lo que es equivalente a 2638 frutos/árbol, como la densidad de plantación fue de 204 árboles/ha, se alcanzó un rendimiento de 21175 kg/ha.

Cuadro 11. Medias^z de rendimiento por árbol.

Sistemas	-----Muestras-----					Media
	kg					
Convencional	148.6	104.4	82	73.6	110.4	103.8 a
Silvopastoril	58	62	66	42.6	40.4	53.8 b
ΔPorcentaje	156.2	68.3	24.2	72.7	173.2	92.9

^zMedias con la misma letra son estadísticamente iguales (DMS 0.05)

El silvopastoril en promedio cada árbol produce 53.8 kg, de acuerdo al peso del fruto, se cosechan 1157 frutos/árbol, y se obtiene un rendimiento de 10975 kg/ha.

Entre las dos formas de producción existe una diferencia del 48.2%, porque el sistema convencional tiene una producción muy cercana del doble de lo producido en el otro sistema, los frutos son de calidad, pero los mejores se producen en el silvopastoril, a pesar de que son arboles de 7 años y cuyo manejo es de poda intensiva para evitar que las ramas cubran los pastos, sin embargo, desde el punto vista económico el ingreso seria mucho menor, si solo se compara la producción de limón, sin contar los productos de leche y carne obtenidos por los bovinos, y semilla de leucaena, donde, posiblemente se supere a la forma del convencional, por ello se sugiere considerar todos los productos que genere el sistema, cuando se realicen comparaciones económicas.

La parte ecológica ve beneficiada, ya que en un mismo espacio y tiempo se combina limón mexicano, bovinos, pasto Tanzania y leucaena, por lo tanto, no se necesita deforestar con el fin de nuevas tierras para la ganadería y citricultura, y desde el punto de vista social es una nueva forma de asociación que poco a poco se empieza adoptar, pero que es necesario intervenir para cubrir las necesidades de los cultivos y forrajes, aunque los arboles de leucaena fijan nitrógeno, este no es suficiente, mientras más componentes se tengan, requieren de mayor cantidad de nutrimentos para cada uno de ellos, y con la forma silvopastoril, también es necesario hacer correcciones nutrimentales basadas en la demanda del cultivo, conforme al rendimiento esperado.

De acuerdo a los resultados encontrados, los sistemas se ubican por abajo de la media para Argentina, Estados Unidos, y Brasil, el rendimiento del sistema convencional está por arriba del promedio de China, España y México. El sistema silvopastoril supera a lo reportado para la India y Egipto, pero requiere fertilización química u orgánica, para el buen funcionamiento del sistema, ya que esta forma de manejo no logra satisfacer la demanda del cultivo, y aunque en el suelo se encuentran la mayoría de los nutrientes en

concentración mayor a la requerida, existe un desbalance y no se absorben adecuadamente, por lo tanto, necesita nutrir al árbol directamente a través de fertilización foliar.

Durante los últimos 5 años, los principales países productores de limas y limones a nivel mundial son India, México, Argentina, China y Brasil respectivamente (China y Brasil constantemente oscilando entre el cuarto y quinto lugar. De acuerdo a datos de la FAO, estos países produjeron en el año 2010 un total de 8.1 millones de toneladas, casi las dos terceras partes de la producción mundial.

Argentina encabeza en cuanto a rendimiento por hectárea, en el año 2008 este país reportó 28.00 t ha⁻¹ seguido por Estados Unidos (23.50 t ha⁻¹) y Brasil con 21.90 t ha⁻¹; México se ha ubicado en la sexta posición por debajo de Italia e Irán, teniendo un comportamiento similar entre estos dos últimos países, manteniendo su rendimiento por hectárea constantes durante los últimos años.

Actualmente, China y España presentan rendimientos menores que los países mencionados anteriormente, con 13.90 y 14.70 t ha⁻¹ respectivamente. Los rendimientos se encuentran en la parte intermedia tomando en cuenta a las potencias productoras de este frutal.

En cambio, India, productor número uno del mundo, reporta uno de los rendimientos más bajos de entre las principales naciones productoras con 8.40 t ha⁻¹, ligeramente debajo de Egipto con 8.80 t ha⁻¹, apenas la mitad o la cuarta parte de lo que se obtiene en México y Argentina (Fundación Produce Guerrero, 2012).

Noriega-Cantú *et al.* (2012) encontraron un rendimiento de limón mexicano con manejo integrado convencional de 11.36 t ha⁻¹, y con manejo orgánico un rendimiento de 10.62 ton ha⁻¹. Pérez y Orozco (2004) evaluaron el rendimiento de limón mexicano con

diferentes dosis de fertilización nitrogenada, fosfatada y potásica en la cual encontraron que el rendimiento fue desde 13.19 hasta 31.85 t ha⁻¹.

SAGARPA (2009) reporta para el estado de Michoacán un rendimiento de Limón de 11.6 t ha⁻¹, con un precio medio rural de 1789.7 \$/t.

Maldonado *et al.* (2001) menciona que el rendimiento promedio de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Christm Swingle) en el Valle de Apatzingán (Michoacán, México) es de 15 t ha⁻¹, pero algunos productores han logrado producir hasta 45 t ha⁻¹. Esta diferencia entre el rendimiento actual y el posible, sugiere la existencia de problemas, posiblemente de carácter nutrimental.

5.6 Propuestas de fertilización

5.6.1 Fertilización sistema convencional

Se espera producir 30 t ha⁻¹ de limón en el sistema convencional, para ello se consideró la demanda del cultivo, densidad de plantación de 204 árboles/ha, 24.01 kg de N inorgánico/ha, aportados por el suelo, además de se propone aplicar urea con 60% de eficiencia del Nitrógeno.

Por cada tonelada de fruta fresca de limón mexicano, en un suelo calcimórfico se extraen 1.86 kg de N, más el doble el doble para cubrir la demanda en la formación de las demás estructuras, y rendimiento esperado, se requiere aplicar (3) (1.86 kg de N) (30 t ha⁻¹) =167.4 kg de N/ha.

La diferencia entre los kilogramos de nitrógeno requerido, de acuerdo al rendimiento esperado menos lo aportado por el suelo, faltaría aplicar 143.48 kg de N/ha, equivalente a 512.8 kg de urea debido al 60% de eficiencia del nitrógeno.

Se recomienda aplicar 1.17 kg de N, ò 2.51 kg de urea por árbol de limón mexicano por ciclo.

No se necesita fertilizar al suelo con K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B, debido a que la demanda del limón es inferior al aporte de los nutrientes del suelo, sin embargo, estos nutrientes no se están absorbiendo adecuadamente, comprobado con los resultados que se muestran el índice de balance kenworthy, por lo que se deben realizar aplicaciones foliares para cubrir las necesidades de fósforo, hierro, manganeso y zinc.

5.6.2 Fertilización sistema silvopastoril

En el sistema silvopastoril se espera producir 22 t ha^{-1} de limón por ha, para ello se consideró la demanda del cultivo, densidad de plantación de 204 árboles/ha, la cantidad de nutrientes aportados por el suelo, nutrientes aportados por el fertilizante y su eficiencia.

Los datos indican que es necesario fertilizar con nitrógeno y fósforo, y de acuerdo con los cálculos, se propone lo siguiente.

Por cada tonelada de fruta fresca de limón mexicano, se extraen 1.86 kg de N, más el doble el doble para cubrir la demanda en la formación de las demás estructuras, y el rendimiento esperado, se requiere aplicar $(3) (1.86 \text{ kg de N}) (22 \text{ t ha}^{-1}) = 122.76 \text{ kg de N/ha}$, pero el suelo aporta 14.71 kg de N inorgánico/ha, por ello, solo se requieren 108.05 kg de N.

Por cada tonelada de limón mexicano se extraen 0.28 kg de fósforo, más la demanda para las otras estructuras, y el rendimiento esperado, el cultivo requiere 18.48 kg de P/ha, y el suelo aporta 10.30 kg de fósforo/ha.

Se recomienda aplicar 151.75 kg de fosfato mono amónico, debido al 20% de eficiencia del fosforo, equivalente a 0.744 kg de MAP/árbol, esta cantidad de fertilizante, también aporta 18.46 kg de N, por ello, el requerimiento restante de nitrógeno se satisface con

320.42 kg de urea/ha o 1.57 kg del fertilizante por árbol de limón, ya que se consideró el 60% de eficiencia del N.

En condiciones normales sólo del 20 al 30 % del fósforo aplicado al suelo como fertilizante es absorbido por la planta durante un ciclo de crecimiento. Se obtiene mayor eficiencia aplicando en forma conjunta P y N que por fuentes distintas, debido que al absorber las plantas el nitrógeno en forma de amonio se acidifica el entorno radicular, facilitando de esta manera la disolución y liberación del fosfato del fertilizante.

No se necesita fertilizar al suelo con K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B, debido a que la demanda del limón es inferior al aporte de los nutrientes del suelo, sin embargo, estos nutrientes no se están absorbiendo adecuadamente, comprobado con los resultados que muestra el índice de balance kenworthy, por lo que se deben realizar aplicaciones foliares para cubrir las necesidades de magnesio, zinc, hierro, manganeso y cobre.

5.7 Temperatura foliar externa

En el Cuadro 12 se muestran los promedios de diversas temperaturas foliares externas tomadas en las horas de mayor radiación solar (14:00 horas).

En promedio se encontró que la temperatura foliar externa del sistema convencional fue de 38.4 °C, el silvopastoril con 31 °C, se puede observar que temperaturas mayores se presentaron en el follaje de los árboles de limón bajo el sistema convencional, con un incremento promedio de 7.4 °C.

Con ello se comprueba que existen menores temperaturas en el sistema silvopastoril, situación que beneficia en un mejor confort para el ganado, al momento de alimentarse de (*Pasto tanzania* y *leucaena leucocephala*), dándole un lugar apropiado para el descanso, fuente de forraje y una mejora importante al poder pastorear durante más

tiempo y baja radiación que reduce el estrés nutrimental y por temperatura de los árboles de limón mexicano.

Se ha demostrado que estos sistemas juegan un rol fundamental en la supervivencia de especies silvestres, además de proveer sombra para los animales en pastoreo.

La disponibilidad de alimento para las aves silvestres es alta en estos sistemas, y la compleja estructura de la vegetación provee un sustrato de anidamiento más adecuado y mejor protección contra depredadores (Pagiola *et al.*, 2004).

Cuadro 12. Medias^z de temperatura foliar externa.

Sistemas	-----Muestras----- °C					Media
Convencional	38.3	40.4	38.3	38.4	36.7	38.4 a
Silvopastoril	31.3	33.8	30.8	30.3	28.8	31 b
ΔPorcentaje	22.3	19.5	24.3	26.7	27.4	23.8

^zMedias con la misma letra son estadísticamente iguales (DMS 0.05)

Los resultados están dentro de los rangos encontrados en diversos trabajos con sistemas silvopastoriles donde se reporta que la temperatura bajo los árboles en condiciones tropicales es de 2 a 3 °C por debajo de la de zonas abiertas y en ocasiones puede ser hasta casi 10 °C menos. Esta reducción en la temperatura favorece la eliminación de calor por evaporación y reduce la carga calórica de los animales, con lo que se incrementa la productividad animal. La sombra también tiene implicaciones directas sobre el comportamiento, la reproducción y la sobrevivencia de los animales (SAGARPA, 2009).

La temperatura influye considerablemente sobre la magnitud de la fuerza motriz para el movimiento del agua fuera de la planta, más que tener un efecto directo sobre los

estomas. Conforme la temperatura sube, la capacidad del aire para retener humedad se incrementa de forma considerable. La cantidad de agua no cambia, pero si la capacidad del aire para retenerla. Debido a que el aire caliente puede retener más cantidad de agua, su humedad relativa es menor y es un aire “más seco”. En el caso opuesto, ya que el aire frío tiene una menor capacidad de retención de humedad, su humedad relativa es mayor y es por lo tanto un aire “más húmedo”. El aire caliente aumenta la fuerza motriz para la transpiración y el aire frío la disminuye. Las temperaturas tienen efecto sobre la velocidad de crecimiento, germinación, transpiración, respiración, fotosíntesis, y absorción de agua y nutrientes.

Las temperaturas elevadas (sobre 30°C) por lo general provocan el cierre estomático, esto puede deberse a un efecto indirecto del estrés hídrico, o a un aumento en la tasa de respiración que puede provocar un incremento en el CO₂ al interior de la hoja. Sin embargo, en algunas especies las temperaturas elevadas provocan la apertura de los estomas. Esta apertura conduce a un aumento de la transpiración, lo que a su vez resulta en la reducción de la temperatura de la hoja. Cuando la hoja está expuesta al viento, y con ello a una reducción de la capa límite, los estomas pueden cerrarse en respuesta a estrés hídrico. En consecuencia, el potencial hídrico de la hoja tiene un importante efecto sobre la apertura y cierre estomático. A medida que el potencial hídrico disminuye, los estomas se cierran. Este efecto puede sobrepasar al efecto de apertura explicado por bajo CO₂ y alta radiación. Las altas temperaturas causan aumento de la respiración, a veces por encima de la tasa de fotosíntesis. Esto significa que los productos de la fotosíntesis se están usando más rápidamente de lo que se produce. Para que se produzca el crecimiento, la fotosíntesis debe ser mayor que la respiración.

La tasa de evaporación de agua se duplica por cada aumento de 10 °C, en la temperatura. No obstante, dada que la evaporación enfría la superficie de la hoja, su temperatura no aumenta tan rápidamente como el aire circundante. Los estomas se cierran cuando la temperatura excede los 30 °C y 35 °C.

Las variables meteorológicas principales, que influyen en el estado térmico del cuerpo de los animales, según Bavera (2004) son: la temperatura del aire, la radiación solar, la humedad relativa, las precipitaciones y la velocidad del viento. Las desviaciones acentuadas de estas variables, a partir de las condiciones óptimas, provocan alteraciones en el ritmo de las actividades vitales, tales como: la temperatura corporal, ingestión, digestión, respiración, circulación de la sangre y el estado de las glándulas de secreción interna (Alfonso, 2001; Álvarez, 2004), y como resultado disminuyen considerablemente los rendimientos productivos, al tiempo que se afecta el estado de salud de los animales (Bergerón y Lewis, 2002).

Pérez *et al.* (2008) reportan que la temperatura ambiental promedio, tanto durante las horas de la mañana como en la tarde, fue menor en el sistema silvopastoril (23.9 y 26.6°C, respectivamente), en comparación con el sitio donde existió únicamente pasto (26.4 y 28.1°C). Esta relación beneficiosa que se establece entre las ganancias de peso y el bienestar animal en los sistemas silvopastoriles, está muy relacionada con el tiempo dedicado al consumo de forraje durante el día. Los animales en el sistema silvopastoril presentaron un mejor comportamiento en cuanto al peso vivo y la ganancia media diaria, con respecto a los del sistema de monocultivo.



Figura 10. Medición de la temperatura foliar externa en los sistemas convencional y silvopastoril.

5.8 Unidades SPAD

La concentración de clorofila y la absorción de nitrógeno se han correlacionado con las unidades SPAD en diversas condiciones ambientales como la intensidad luminosa, temperatura, humedad relativa, plagas, densidad de población, fuente de nitrógeno, etc. (Hiderman *et al.*, 1992).

En el Cuadro 13 las hojas que presentaron mayores unidades SPAD o de color verde, fueron aquellas de los árboles cultivados bajo el sistema silvopastoril, con resultados promedios de 59.5, mientras que la menor intensidad de color verde, estuvo hojas de árboles que desarrollan bajo el sistema convencional con promedio de 51.1, una diferencia entre sistemas del 14.12%, con estos valores se encontró un exceso de nitrógeno, debido a una posible fertilización foliar antes del muestreo. Además, el sistema convencional presento una coloración con valores promedios más distantes, lo cual indica que son hojas cloróticas o con menor cantidad de color verde, resultado que

está muy relacionado con la cantidad de N y otros nutrimentos encontrada en las hojas de este sistema.

Cuadro 13. Medias^z de unidades SPAD en hojas de limón mexicano.

Sistemas	-----Muestras----- °C			Media
Convencional	47.4	54.4	51.5	51.1 a
Silvopastoril	59.8	60.2	58.5	59.5 b
ΔPorcentaje	26.1	10.6	13.5	16.4

^zMedias con la misma letra son estadísticamente iguales (DMS 0.05)

Las unidades SPAD se registran a través de diferentes aparatos entre los que se indican el Minolta SPAD 502, el cual mide el color promedio de la hoja y de manera indirecta la clorofila. La determinación se realiza mediante la luz transmitida a través de la hoja a una longitud de 650 nm (longitud de onda fotosintéticamente activa) y 940 nm (Piekielek *et al.*, 1995).

Turner y Jund (1991), con un modelo reciente del detector de clorofila SPAD-502, demostraron que la “unidad SPAD” es un valor proporcional al contenido de nitrógeno en la planta de arroz.

En la Figura 11 se muestra cómo se determinó la intensidad del color verde en unidades SPAD, sin destruir la hoja de limón mexicano y de manera rápida, nótese como las hojas con verde intenso presentan una superioridad de unidades spad en comparación con las cloróticas, con algunos valores de 55.4 contra 24.8 en la esquina superior derecha, la mayoría de los resultados bajos corresponde a los limoneros del sistema convencional.



Figura 11. Medición del color las hojas (unidades SPAD).

Reportes indican que la cantidad de clorofila y de nitrógeno total determinados por los métodos tradicionales en leguminosas, gramíneas, frutales y hortalizas presenta una alta correlación con las unidades SPAD medidas con el detector de clorofila Minolta SPAD-501 (Reeves *et al.*, 1993). Existe una relación entre el contenido de nitrógeno en hoja y la concentración de clorofila en la misma, ya que la mayoría del N de las hojas está contenido en las moléculas de clorofila y, por tanto, la capacidad fotosintética de las hojas es función de la concentración foliar de este elemento. A su vez, el contenido en clorofila puede utilizarse en el manejo de programas nutricionales (Blasco *et al.*, 2010).

Ambriz *et al.* (2013) realizaron diversas prácticas culturales en limón persa y encontraron valores de unidades SPAD de 57.6, 55.6, 57.4, 57.6, 53.8, 55.5, 56.1, todos estos medidos en el mes de enero, en promedio 56.3, valor que supera a lo encontrado en el sistema convencional, pero es inferior comparado con el silvopastoril.

Rincón y Ligarreto (2010) encontraron que la distribución de clorofila en hojas de maíz, se localizaron los más altos contenidos de clorofila en el tercio medio (hoja de la 6 a la 13), estos valores se presentaron en un rango de 50 y 54 unidades SPAD. Contenidos

que coinciden con los reportados por Novoa y Villagran (2002) quienes determinaron que un valor adecuado de clorofila para un buen rendimiento de grano de maíz debe ser superior a 50 unidades SPAD en las hojas. El Cuadro 14 muestra que el 28.8% de las hojas del limón se encuentran en la clase de 51.6 a 56.6 unidades SPAD, y solo el 1.1% corresponde a las hojas con mayor intensidad de clorosis, sin embargo, hay porcentajes que presentan bajas unidades SPAD, por lo que manifiesta la deficiencia nutrimental marcada del sistema, se trata de árboles con menor contenido de clorofila, y reducida captación de luz afectando el proceso de fotosíntesis, además los resultados coinciden con las características de los frutos, y con ello se nota que el desbalance nutrimental trae consigo una serie de problemas afectando la producción, que de no ser corregidos el sistema tendrá arboles con clorosis generalizada , además de ser más susceptibles al ataque de plagas y enfermedades.

Cuadro 14. Frecuencias de clase correspondientes a unidades SPAD en hojas de limón mexicano, sistema convencional.

Clase	Fa ^z	Fr ^y	%
21.6 < x ≤ 26.6	1	0.011	1.1
26.6 < x ≤ 31.6	4	0.044	4.4
31.6 < x ≤ 36.6	6	0.066	6.6
36.6 < x ≤ 41.6	3	0.033	3.3
41.6 < x ≤ 46.6	9	0.1	10
46.6 < x ≤ 51.6	15	0.166	16.6
51.6 < x ≤ 56.6	26	0.288	28.8
56.6 < x ≤ 61.6	19	0.211	21.1
61.6 < x ≤ 66.6	7	0.077	7.7

^zFa: frecuencia absoluta, ^yFr: frecuencia relativa

El Cuadro 15 muestra que el 23.8% de las hojas del limón se encuentran en la clase de 59 a 62.4 unidades SPAD, y solo el 2.2 % corresponde a las hojas con mayor intensidad de clorosis, pero con valores que van de 42 a 45.4, se trata de árboles verde intensos, con mayor contenido de clorofila por lo que beneficia a la actividad fotosintética, reflejada en las características de los frutos de calidad.

Cuadro 15. Frecuencias de clase correspondientes a unidades Spad en hojas de limón mexicano, sistema silvopastoril.

Clase	Fa ^z	Fr ^y	%
$42 < x \leq 45.4$	2	0.022	2.2
$45.4 < x \leq 48.8$	3	0.033	3.3
$48.8 < x \leq 52.2$	5	0.055	5.5
$52.2 < x \leq 55.6$	13	0.144	14.4
$55.6 < x \leq 59$	14	0.155	15.5
$59 < x \leq 62.4$	21	0.233	23.3
$62.4 < x \leq 65.8$	16	0.177	17.7
$65.8 < x \leq 69.2$	13	0.144	14.4
$69.2 < x \leq 72.6$	3	0.033	3.3

^zFa: frecuencia absoluta, ^yFr: frecuencia relativa

5.9 Porcentaje de colonización micorrícica

Se observaron diferencias en el porcentaje de micorrizas, y de acuerdo con la forma de manejo (convencional y silvopastoril) se crean ciertos ambientes, con distintas condiciones fisicoquímicas que dan lugar a la asociación entre las raíces de los limoneros y hongos micorrícicos, variando en porcentaje total y por estructuras.

Este tipo de asociación beneficia a las plantas de limón, debido a que la mayoría de los nutrientes del suelo se encuentran en bajas concentraciones o deficiencias, por ello, la importancia micorrícica al contribuir en la absorción y transporte de nutrientes, principalmente de fosforo (Jaramillo, 2011).

De acuerdo con el análisis micorrícico general del Cuadro 16, los resultados encontrados muestran diferencias entre el sistema convencional y silvopastoril, con un porcentaje superior de micorrizas en el sistema convencional, pero, al considerar cantidad de fósforo por hectárea que hay en cada uno de los sistemas 32.26 kg ha⁻¹ y 10.29 kg ha⁻¹ respectivamente, para el convencional le corresponde el 1% de micorrizas por cada kilogramo de fósforo, mientras que el silvopastoril el 2.16% de micorrizas, dato que está relacionado con la cantidad de fósforo que posee este sistema. Es decir, que a un nivel bajo fósforo aumenta la asociación con micorrizas.

Si comparamos los porcentajes de hifas y vesículas solo en el sistema convencional, este presentan una diferencia del 6.7%, pero no así para el sistema silvopastoril donde los porcentajes entre ambas estructuras difieren con el 10%, al comparar el porcentaje de vesículas entre ambos sistemas, el silvopastoril tuvo 52% menos que el convencional y los porcentajes de hifas difieren con el 3.33%.

Cuadro 16. Determinación del porcentaje micorrícico.

Sistemas	-----Micorrizas-----		
	% Total	% Vesículas	% Hifas
Convencional	32.2	12.7	19.4
Silvopastoril	22.2	6.1	16.1
ΔPorcentaje	45	108.2	20.5

Con estos datos queda en manifiesto, que las hifas del silvopastoril están realizando mayor función que las del convencional, porque los nutrientes que extraen, rápidamente son aprovechados por los limoneros y solo un pequeño porcentaje se acumula en las vesículas, además de que las micorrizas del sistema convencional habitan en un ambiente con mejores condiciones para que se desarrollen.

Para el caso del sistema silvopastoril, con la presencia de micorrizas se incrementan la tolerancia de las plantas al pastoreo, por el suministro de nutrientes a las plantas huésped, los cuales estimulan el rebrote continuo de las pasturas después de las defoliaciones hechas. Los resultados encontrados sugieren que la defoliación, por el pastoreo de los bovinos, altera fuertemente el desarrollo de las reservas de las plantas para estimular fuertemente el desarrollo de la simbiosis.

Los cambios en la composición de las especies de micorrizas y el decrecimiento en la diversidad con el pastoreo continuo, indican que la defoliación provoca la alteración del microambiente del suelo y como consecuencia disminución en la diversidad, pero esto a la vez conduce a que ciertos géneros, *Glomus*, *Paraglomus* y *Gigaspora*, puedan adaptarse a las condiciones del pastoreo (Ahn-Heum *et al.*, 2001; Pérez y Peroza, 2013).

Debido a la presencia de micorrizas los gastos por fertilización, riego, pesticidas, disminuyen o más bien deberían disminuir, por la asociación de las micorrizas, siempre y cuando la asociación sea efectiva, además de que es necesario considerar los análisis de suelo, para conocer las cantidades nutrimentales que serán restadas a la demanda del cultivo y en su caso complementar con la cantidad de fertilizante requerido, de lo contrario trae problemas económicos, ecológicos y hasta sociales. La presencia micorrícica permite un sistema de producción más rápido, limpio y eficiente, convirtiéndose en una estrategia válida para entregar a los agricultores. Aunque,

Harrison (1997) menciona que la fertilización química puede disminuirse de un 50 a 80%, ya que la MA mejora la absorción de nutrientes del suelo, los resultados encontrados para este trabajo difieren, ya que el sistema convencional es fertilizado químicamente, lo que genera costos y presenta mayor % de micorrizas.

Del 40 al 50% de los fertilizantes químicos aplicados se lixivian, contaminando suelos, ríos, arroyos, mantos freáticos y la atmósfera.

De acuerdo con Molina *et al.* (2005), concluyeron que las micorrizas arbusculares constituyen una alternativa valiosa para disminuir el tiempo de entrada de animales a pastoreo al reducir el tiempo de establecimiento de árboles para los sistemas silvopastoriles.

Las plantas micorrizadas crecen mejor que las no micorrizadas en suelos infértiles, porque tienen la ventaja de explorar mayor volumen de suelo, reducen el estrés hídrico, presentan resistencia a enfermedades (Martínez y Pugnaire, 2009). Las condiciones anteriores hacen al cultivo más productivo, reflejado en el rendimiento, dato que corresponde con los resultados del sistema convencional, donde se encontró mayor porcentaje de micorrizas y muy superior en kilogramos de fruto por hectárea, sin embargo, los porcentajes micorrícicos entre las dos formas de manejo, son reducidos.

Los sistemas estudiados y otras formas de cultivo, comprenden una serie de factores que interaccionan para dar lugar a productos, entre ellos, los nutrientes del suelo-planta, agua, textura, pH, materia orgánica, temperatura, micorrizas, todos funcionan en conjunto y en equilibrio, de lo contrario reduce la calidad de los frutos.

Son diversas las funciones de las micorrizas, ante lo cual se han desarrollado trabajos que ponen en manifiesto el beneficio de estos organismos, como a continuación se mencionan.

Miyasaka y Habte (2003) en estudios realizados concluyeron, que la absorción más eficiente por las raíces micorrizadas se debe fundamentalmente a una aceleración de la disociación del fosfato insoluble. De igual forma, Maldonado y Ramírez (1997) consideran que las micorrizas permiten lograr una mayor absorción de nutrientes en la solución del suelo, en especial de elementos pocos móviles, fundamentalmente el fósforo y otros como zinc, azufre, calcio, molibdeno, boro.

Con respecto a la fertilización con fósforo, Rodríguez *et al.* (2002) encontraron efecto positivo en la actividad de la micorriza y en el crecimiento de las plantas. Estos autores encontraron respuesta de (*Leucaena leucocephala*) a la inoculación micorrizal, aún con niveles altos de fósforo en la solución del suelo.

Bago *et al.* (2003) menciona que aunque la planta es capaz de crecer de manera independiente, generalmente, tiene mayor desarrollo cuando es colonizada con hongos micorrizicos; sobre todo en condiciones de bajos nutrimentos en el suelo, característica de los suelos tropicales que afectan la productividad agrícola.

Así mismo, Raddattz (2002) reportan que en la asociación, el hongo recibe de la planta productos fotosintéticos (fotosintatos), los cuales son adquiridos por el hongo en un porcentaje de 1 a 12% de todos los fotosintatos asimilados por la planta, los que a su vez son intercambiados en las células del parénquima de la raíz por moléculas que contienen fósforo, nitrógeno, potasio, magnesio, zinc, azufre, calcio, entre otros. Miyasaka y Habte (2003) presenta parámetros como la longitud, el diámetro, el área de superficie y la densidad de vellosidades de la raíz, importantes para aumentar los nutrientes tomados por la planta. El incremento en la nutrición mineral aumenta los contenidos de clorofilas y como consecuencia una alta tasa fotosintética (Bian *et al.*, 2001; Feng *et al.*, 2002).

En la Figura 12 se observa la colecta de raíces secundarias de limón mexicano, ubicadas en la zona de goteo, y encontradas en los primeros centímetros del suelo, las cuales fueron identificadas para su posterior preparación y análisis de laboratorio, nótese el número de raíces que se han desarrollado para un mejor anclaje, además de absorber agua y nutrientes con el fin de abastecer la demanda del árbol, sin embargo, estas se enfrentan a un desequilibrio nutrimental, por lo que requiere hacer las correcciones.



Figura 12. Extracción de raíces secundarias en árboles de limón mexicano.

Las raíces analizadas están asociadas a endomicorrizas bajo condiciones naturales, con ello se manifiesta que existe material para micorrizar las demás plantas, lo que implica conocer la relación hongo-planta, aislar cepas específicas, que permitan potencializar el crecimiento y productividad de los árboles en los sistemas, e infectar toda la plantación con estos hongos micorrícicos, con la ventaja de aprovechar cepas nativas y adaptadas a las condiciones del medio, por lo cual se asegura un alto porcentaje de asociación.

En la Figura 13 muestra el proceso de tinción de las raíces, colocación uniforme sobre portaobjetos, y observación al microscopio, con el fin de determinar el porcentaje total y por estructuras (hifas y vesículas).



Figura 13. Observación de estructuras micorrícicas.

Los beneficios de esta asociación son múltiples y en condiciones naturales la investigación está avanzando, se han encontrado porcentajes muy similares, a los evaluados con limón mexicano, como enseguida se menciona y con ello se tiene que la infección varía de acuerdo a la forma de manejo, labranza, fertilización química, uso de fungicidas, especie, edad de la planta etc., y condiciones edafoclimáticas.

Resultados similares de micorrizas, del presente estudio sistemas convencional y silvopastoril (32.2 y 22.2%), fueron obtenidos por Muños *et al.* (2009) quienes determinaron el grado de micorrización natural en arboles de nogal pecanero (*Carya illinoensis* K. Koch) y encontraron un rango que fue de 13 a 32% de infección, con estructuras de vesículas, esporas y micelio.

Otra investigación que reportan un porcentaje de colonización similar fue por Ballesteros *et al.* (2004) correspondió *Bactris gassipaes* presentó el 20%; *Borojoa patinoi* (12%) y *Theobroma cacao* (8) presentaron los valores más bajos, el mismo autor obtuvo un resultado superior al presente trabajo, con *Musa sp* (48%).

Las micorrizas arbusculares, interactúan con una amplia diversidad de microorganismos del suelo en las raíces, en la rizósfera y en la masa del suelo.

La interacción puede inhibir o estimular, aunque estos hongos no pueden fijar biológicamente el nitrógeno atmosférico, incrementan la fijación de este compuesto porque interactúan positivamente con los fijadores de nitrógenos (Cano, 2011).

En cuanto a las características del suelo, la densidad aparente está muy relacionada con el porcentaje micorrícico y este coincide con lo encontrado en los sistemas, ya que el silvopastoril mostro mayor densidad aparente con una notoria compactación y menor porcentaje de micorrizas. Además se menciona que los suelos compactados reducen su fertilidad y la distribución de las raíces de las plantas y de las hifas de las micorrizas arbusculares en la rizósfera se ve afectada (Jeffries y Barea, 1999). Otro factor físico que afecta el funcionamiento de las micorrizas arbusculares, es la intensidad del pastoreo producidos por animales herbívoros. Encontraron que tres especies de pastos, sometidas a defoliaciones, responden diferentemente con respectos a los cambios en la dinámica de micorrización. En digitaria (*Digitaria sanguinalis*) y lolium (*Lolium perenne*) la colonización disminuyó, pero la cantidad de hifas en el suelo no fue afectada. De otra parte themedra (*Themeda triandra*), quien es susceptible al pastoreo, no mantiene cantidades de hifas en el suelo después de la defoliación (Jeffries y Barea, 1999).

En la Figura 14 se observan vesículas bien definidas en las células corticales de las raíces de limón, cuyo porcentaje fue menor comparado con las hifas, y de acuerdo con Parniske (2008) estas estructuras, son reservorio de nutrientes y lípidos del hongo, lo cual puede ser una estrategia para nutrir al árbol en las temporadas más secas del año, además, funcionan como organelos reproductivos que crecen dentro y entre las células. Poseen forma globosa, y no son efímeras como los arbúsculos, sino que desde que

aparecen van madurando pudiendo en algunas ocasiones, llegar a convertirse en esporas, y la transformación de vesícula a espora, podría estar ligada a situaciones de estrés para la micorriza o la muerte inminente de la planta.

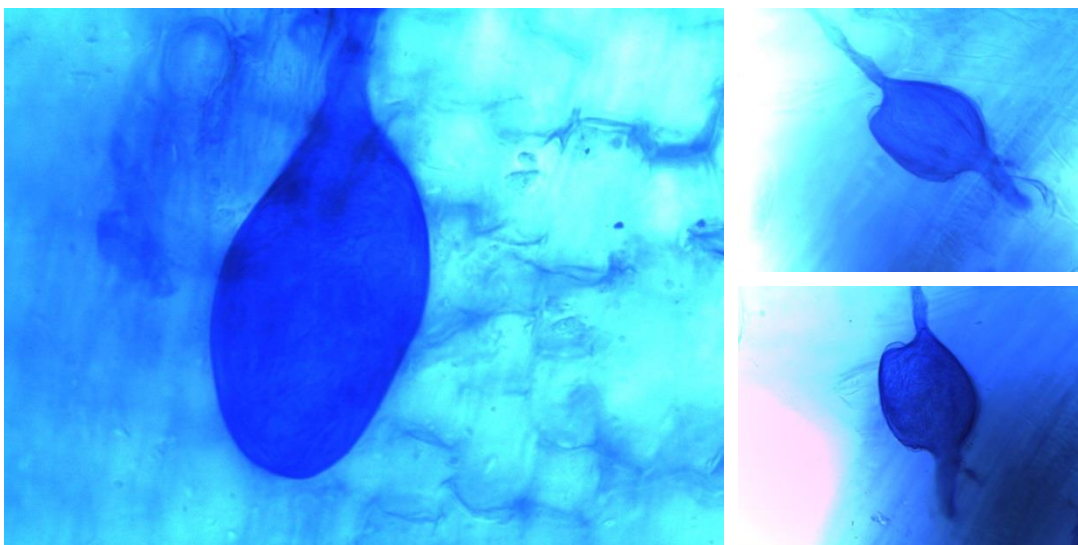


Figura 14. Vesícula observada a 100x en raíces de limón mexicano, Apatzingán, Michoacán.

En la Figura 15 se observan las hifas encontradas en los dos sistemas, mismas que benefician a los arboles de limón, debido a que estas estructuras se pueden extenderse varios centímetros desde las raíces, aumentando el volumen de suelo explorado para la absorción de los elementos de poca movilidad. Las hifas son abundantes en la corteza radical, y de menor dimensión que las raíces, en ellas se forman las esporas que son estructuras de conservación y reproducción del hongo, González *et al.* (1998) pueden penetrar entre los poros más fácilmente, esta relación hongo raíz presenta ganancia de ambos componentes, situación que resulta clara tanto para el caso de trópico como para lugares áridos, en donde lo que le falta a la planta para producir suficientes carbohidratos y crecer adecuadamente, son los nutrientes y lo único que le falta al hongo para crecer son los carbohidratos.

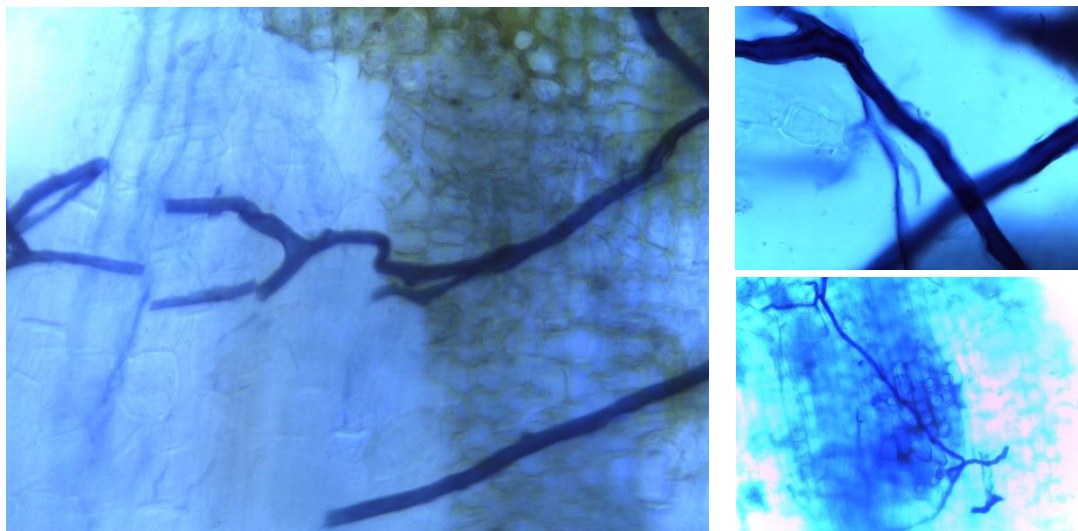


Figura 15. Hifa observada a 40x en raíces de limón mexicano, Apatzingán Michoacán.

Además, como parte de la cadena trófica, las hifas de estos hongos son consumidas por la fauna del suelo, como los nemátodos y los microartrópodos. Asimismo, las hifas constituyen una parte importante de la biomasa del suelo y son un importante sumidero de carbono, ya que los hongos micorrizógenos asociados a las especies vegetales reciben entre el 57% y 90% del carbono de los árboles, y llegan a representar hasta el 50% de la biomasa microbiana total del suelo (Olsson *et al.*, 1999)

VI. CONCLUSIÓN

Las características de los suelos donde se implementaron los sistemas convencional y silvopastoril de limón mexicano, presentan textura arcillosa, pH neutro (> 7.3), bajo contenido de materia orgánica, muy bajo N inorgánico, de medio a muy bajo de P disponible, muy altos en K, Ca, Mg y Cu, muy bajo en Fe y Mn; de medio a bajo en Zn y B, en el convencional se encontró mayor capacidad de campo y punto de marchitez permanente; en el silvopastoril mayor densidad aparente, pero, ambos sistemas son afectados por la compactación.

En cuanto al estado nutrimental del limón mexicano, según el índice de balance Kenworthy, para el sistema convencional, el orden de requerimiento nutricional fue: $P > Fe > Mn > Zn > Mg > Ca = Cu > K > B > N$, mientras que en el silvopastoril $Zn > Fe > Mn > Cu > P > Mg > Ca > B > K > N$, el orden difiere muy poco con lo reportado en la literatura.

El método de desviación óptima porcentual (DOP) indica que hay un exceso de N, K, B; deficiencia en P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu, con mayor limitación del primer macronutriente y, entre los micronutrientes más limitantes el Fe seguido de Zn, Mn y Cu. La evaluación nutrimental de ambos sistemas indicó que se requiere fertilización en ambos sistemas, aunque el silvopastoril se muestre como una alternativa de manejo, ya que en éste no logró cubrir las necesidades nutrimentales del limón,

El orden de extracción de nutrientes en frutos de limón mexicano fue: $N > K > Ca > Mg > P$, en cuanto a los micronutrientes $Fe > B > Zn > Mn > Cu$.

El rendimiento por hectárea fue de 21175 kg en el convencional y 10975 kg en el silvopastoril, con una diferencia de producción del 48.2%. En ambos sistemas se producen frutos de calidad, pero los mejores estuvieron en el silvopastoril.

En el sistema silvopastoril se determinó menor temperatura (7.4°C) en la copa de los árboles, respecto al sistema convencional lo que reduce la presencia de clorosis férrica por foto oxidación de clorofilas, posee un mejor ambiente, tanto para las plantas como para los animales y las unidades SPAD mostraron una diferencia de 14.12% encontrándose hojas y árboles menos verdes o cloróticas en el sistema convencional. Además se determinó una mayor asociación micorrícica a niveles bajos de fósforo en el sistema silvopastoril.

VII. LITERATURA CITADA

- Agustí, M. 2003. Citricultura. Segunda edición. Ed. Mundiprensa (España). 423p.
- Ahn-Heum, E., W. Gail, and D. Hartnett. 2001. Effect of ungulate grazer on arbuscular mycorrhizal simbioses and fungal community structure in tall grass prairie. *Mycología* 93 (2): 233-242.
- Alexander, P., M. Bahret, J. Chsves, G. Courts, and N. D. Alessio. 1992. *Biología*. Prentice Hall Ed. Englewood, New Jersey. 295-299.
- Alfonso, O. 2001. Fisiopatología veterinaria. Nosopatogénesis general y alteraciones metabólicas, digestivas y hepáticas. Editorial Félix Varela. La Habana, Cuba. 155 p.
- Alonso J., R. Sampaino A., G. Febles., y G. Achang. 2007. Comportamiento de la composición química del suelo en un sistema silvopastoril Leucaena-guinea. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 41(2): 189-192.
- Álvarez, A. 2004. Fisiología de la termorregulación de los vertebrados superiores en su entorno. Curso Facultad Medicina Veterinaria. UNAH. La Habana, Cuba. 23 p.
- Álvarez A., R., C. Saucedo V., S. Chávez F., V. Medina U., M. T. Colinas L., y R. Báez S. 2008. Reguladores de crecimiento en la maduración y senescencia de frutos de limón mexicano. *Agricultura Técnica en México* 34(1): 5-11.
- Ambriz C., R., I. Alía T., R. Ariza F., A. Lugo A., M. Andrade R., V. López M., O. G. Villegas T., y D. Guillen S. 2013. Ensayo de inducción de la floración de limón persa (*Citrus latifolia* Tan.) en Morelos México. *Ciencias Agrícolas Informa* 22(1): 4-14.

- Anguiano J., M., J. Aguirre, y M. Palma J. 2012. Establecimiento de *Leucaena leucocephala* con alta densidad de siembra bajo cocotero (*Cocos nucifera*). Revista Cubana de Ciencia Agrícola 46: 103-107.
- Ankerman R., L., and R. Large. 1977. Soil and plant analysis. Memphis, USA, A- and L. Agricultural Laboratories, I.N.C. Memphis. pp: 75-78.
- Ariza, R., R. Cruzaley, E. Vázquez, A. Barrios, y N. Alarcón. 2004. Efectos de las labores culturales en la producción y calidad de limón mexicano de invierno. Revista Fitotecnia Mexicana 27(1): 73-76.
- Ascencio, J., y J. Lazo V. 2001. Crecimiento y eficiencia de fósforo de algunas leguminosas cultivadas en arena regada con soluciones nutritivas con fosfatos inorgánicos de hierro y calcio. Rev Fac Agron. 18(1): 13-32.
- ASERCA. 2002. Comercialización de los productos agropecuarios: limón mexicano. Apoyos y servicios a la comercialización agropecuaria en México. SAGARPA. México, D. F. 101: 1-30.
- Azcón, C., and J. M. Barea. 1996. Arbuscular mycorrhizas and biological control of soil-borne plant pathogens an overview of the mechanisms involved. Mycorrhiza 6(6): 457-464.
- Bacab H., M., J. Solorio F., y B. Solorio S. 2012. Efecto de la altura de poda en *Leucaena leucocephala* y su influencia en el rebrote y rendimiento de *Panicum maximum*. Avances en Investigación Agropecuaria 16: 65-77.
- Bago B., P. E. Feffer., J. Abubaker., J. Junn., J. W. Allen., J. Brouillette., D. D. Douds., P. J. Lammers., and Shachard-Hill. 2003. Carbon export from arbuscular micorrhizal roots involves the translocation of carbohydrate as well as lipid. Plant Physiol. 131: 1496-1507.

- Ballesteros P., W., A. Unigarro S., S. C. Rosero B., y A. F. Solarte R. 2004. Determinación de hongos formadores de micorrizas (hma) en *Theobroma cacao* L, *Musa sp.*, *Simmonds*, *Borojoa patinoi*. *Cuatr* y *Bactris gasipaes* HBK en el municipio de Tumaco, Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas* 21(2): 1-9.
- Batis M., M. Alcocer, M. Gual, C. Sánchez, y C. Vázquez-Yanes. 1999. árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y reforestación. Instituto de Ecología UNAM/CONABIO. México.
- Bavera G., A. 2004. Comportamiento etológico de bovinos de carne. Curso de producción bovina de carne. Cap. IV. Fac. Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba, Argentina. <http://www.produccion-animal.com.ar/>. Consultada el 6 de julio del 2014.
- Beer J., I., M. Somarriba, E. Barrance, y A. Leakey R. 2004. Establecimiento y manejo de árboles en sistemas agroforestales. Capítulo 6. Árboles de Centroamérica. OFICATIE. 46 p.
- Belsky, A., J., S. M. Mwonga, and J. M. Duxbury. 1993. Effects of widely spaced trees and livestock grazing on understory environments in tropical savannas. *Agroforestry Systems* 24: 1-20.
- Benton, J. Jr. 2003. Agronomic handbook. Management of crops, soils, and their fertility. CRC PRESS. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C. USA. 450 p.
- Bergerón, R., and N. Lewis. 2002. Transporte, salud y bienestar de los animales de granja. *Revista Producción Animal* 4 (23): 178-186.

- Bescansa, P., M. J. Imaz, I. Virto, A. Enrique, and W. B. Hoogmoed. 2006. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid. *Soil & Tillage Research* 87:19-27.
- Bian, X., L. Hu., X. Li., and F. Zhang. 2001. Effect of VA mycorrhiza on the turfgrass quality and mineral nutrient uptakes. *Acta Prataculturae Sinica*. 10: 42–46.
- Blasco, B., J. Rios J., M. Cervilla L., E. Sánchez-Rodríguez, M. M. Rubio-Willhelmi, A. Rosales M., M. Ruiz J., and L. Romero. 2010. Photorespiration in lettuce plants (*Lactuca sativa* L.): Induced changes in response to iodine biofortification. *Journal of Plant Growth Regulation* 29 (4): 477-486.
- Boby, V., A. Balakrishna, and D. Bagyaraj. 2008. Interaction between *Glomus mosseae* and soil yeasts on growth and nutrition of cowpea. *Microbiological Research* 163: 693-700.
- Bremer, J., M. 1965. Total nitrogen. *Methodos of soils analysis*. Parte 2. *Agronomy* 9. American Societi of Agronomy. In C.A. Black (Ed). pp: 1135-1147.
- Bryla, D. R., T. J. Bouma, U. Hartmaond, and D. M. Eissenstat. 2001. Influence of temperature and soil drying on respiration of individual roots in citrus. *Plant Cell and Enviroment* 24(8): 781-790.
- Bugarín J., J. Bojórquez I., C. Lemus, R. Murray R., A. Hernández, H. Ontiveros, y J. Aguirre. 2010. Comportamiento de algunas propiedades físico-químicas del suelo con diferente sistema silvopastoril en la llanura norte de Nayarit. *Cultivos Tropicales* 31(2): 48-55.
- Cadena Z., M., S. Campos M., M. Cantú S., y A. Zermeño G. 2008. Evaluación de funciones de edafotransferencia para estimar la curva de retención de humedad para uso en la planeación de labranza. *Terra Latinoamericana* 26(2): 93-102.

- Camacaro S., J. C. Garrido, y W. Machado. 2004. Fijación de nitrógeno por *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium* y *Albizia lebbeck* y su transferencia a las gramíneas asociadas. *Zootecnia Tropical* 22(1): 49-69.
- Camargo-Ricalde, S., L. 2002. Dispersal, distribution and establishment of arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 71: 33-44.
- Cano M., A. 2011. Interacción de microorganismos benéficos en plantas: Micorrizas, *Trichoderma* spp. y *Pseudomonas* spp. Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación científica* 14(2):15-31.
- Cardoso, I. M., and T. W. Kuyper. 2006. Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 116 (2): 72–84.
- Chapin, F. S., A. J. Bloom, C. B. Field, and R. H. Waring. 1987. Plant responses to multiple environmental factors. *BioScience* 37: 49-57.
- Chapman, H. 1960. Leaf and soil analysis in citrus orchards. *Agricultura Experimental Station, University of California. Berkeley. CA.*
- Chapman, H., D. 1968. The mineral nutrition of citrus. In: W. Reuther, L. D. Batchelor y H. J. Webber (eds.). *The citrus industry. Agricultural Experimental Station. Division agricultural Sciences, University of California. Berkeley CA. pp: 127-289.*
- Chávez C., X. 1996. Manual para producir limón en el valle de Apatzingán, Michoacán. *Agenda técnica 3. Instituto nacional de Investigaciones forestales Agrícolas y Pecuarias. Paracuaro, Michoacán, México.*

- Chouliaras, V., I. Therios, A. Molassiotis, A. Patakas, and G. Diamantidis. 2004. Effect of iron deficiency on gas Exchange and catalase and peroxidase activity in citrus. *J. Plant Nutr.* 27: 2085-2099.
- CIPAV. 1999. Agroforestería para la producción animal sostenible. In: I Congreso Latinoamericano sobre agroforestería para la producción agrícola sostenible/VI Seminario Internacional sobre sistemas agropecuarios sostenibles. Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV). Cali. 45 p.
- Claassen, N., and B. Steingrobe. 1999. Mechanistic simulation models for a better understanding of nutrient uptake from soil. In: Mineral nutrition of crops. Fundamental mechanisms and implications. Rengel Z. (Ed).
- Cohen, A. 1976. Citrus fertilization. International Potash Institute. Bern Switzerland.
- CONAFOR. 2009. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/9/3838Memoria%20del%20Estudio%20Regional%20Forestal%201603.pdf>. Consultada el 4 de agosto del 2014.
- CONAFOR. 2010. <http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/SISTEMAS-SILVOPASTORIL.pdf>. Consultada el 20 de octubre del 2014.
- Contexto ganadero. 2013. Fundación Produce Michoacán. <http://contextoganadero.com/reportaje/en-la-busqueda-de-productores-innovadores-citrico-silvopastoriles>. Consultada el 12/02/14.
- Contreras M. E., G. Almaguer B., J. R. Espinoza E., R. Maldonado T., y E. Álvarez S. 2008. Distribución radical de árboles de limón persa (*Citrus latifolia Tan*). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 14(2): 223-234.

- Corwell, W., B. Bedford, and C. Chapin. 2001. Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in a phosphorus poor wetland and mycorrhizal response to phosphorus fertilization. *American Journal of Botany* 88 (10): 1824-1829.
- 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.
- Crespo G., E. Castillo, y I. Rodríguez. 1998. Estudio del reciclado de NPK en dos sistemas de producción de vacunos de carne en pastoreo. . *Memorias III Taller Internacional Silvopastoril "Los árboles y arbustos en la ganadería"*. EEPF "Indio Hatuey" Matanzas, Cuba. 234 p.
- Crespo G., I. Rodríguez, J. Ortiz, V. Torres, y G. Cabrera. 2005. Contribución al conocimiento del reciclaje de los nutrientes en el sistema suelo-pasto-animal en Cuba. pp: 9-13.
- Cruz-Flores, G., D. Flores R., G. Alcántar G., A. Trinidad S., y R. A. Vivanco E. 2002. Eficiencia de uso de nitrógeno y fósforo en genotipos de trigo, triticale y maíz. *Terra* 20: 47-54.
- Curti D., S., A., X. Loredó S., U. Díaz Z., J. A. Sandoval R., y J. Hernández H. 2000. Tecnología para producir limón persa. INIFAP-CIRGOC. Campo Experimental Ixtacuaco. Libro Técnico 8. Veracruz, México.
- Dalzell, S., M. Shelton, B. Mullen, P. Larsen, and K. McLaughlin. 2006. *Leucaena: A guide to establishment and management*. Chapter 4: Grazing management; *Leucaena toxicity and the leucaena bug*. Meat and Livestock. Australia Limited. Australia. 70 p.

- Damián-Nava, A., V. A. González-Hernández, P. Sánchez-García, C. B. Peña-Valdivia, y M. Livera-Muños. 2006. Dinámica y diagnóstico nutrimental del guayabo en Iguala, Guerrero, México. *TERRA Latinoamericana* 24(1): 125-132.
- Daza, T., M., C., F. Hernández F., y F. Alba T. 2014. Efecto del uso del suelo en la capacidad de almacenamiento hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 67(1): 7189-7200.
- Domínguez E., V. Cortés, R. M. Ávila, L. Olvera, J. Vernon, E. Bosques, y J. Domínguez. 2003. Aumento de la vida postcosecha de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) producido en Apatzingán Mich., mediante el uso de recubrimientos naturales a diferentes temperaturas. *Revista Iberoamericana de Tecnología y Postcosecha* 5(2): 128-133.
- Donnini, S., A. Castagna, L. Guidi, G. Zocchi, and A. Ranieri. 2003. Leaf responses to reduced iron availability in two tomato genotypes: T3238FER (iron efficient) and T3238fer (iron inefficient). *J of Plant Nutrition* 26: 2137-2148.
- Dupuis, M. 1969. Dosage des carbonates dans les fractions granulométriques de quelques sols calcaires et dolomitiques *Ann Agron.* 20: 61-88.
- Dussel P., E. 2002. Territorio y competitividad en la agroindustria en México: Condiciones y propuestas de política para los clusters del limón ‘mexicano’ en Colima y la piña en Veracruz. Ed. Plaza y Valdéz, S. A de C. V. 1^{ra} edición. México D.F. 270 p.
- Edward J., P. 2000. La ciencia del suelo y su manejo. Editorial Paraninfo. Madrid, España. pp: 350-405.
- Escudero A., y S. Mediavilla. 2003. Dinámica interna de los nutrientes. *Ecosistemas* 12(1): 1-8.

- Etchevers B., J. 1987. Diagnóstico visual. Colegio de Postgraduados. Chapingo, Estado de México.
- Etchevers B., J., D. 1988. Manual de métodos de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes. Centro de Edafología Colegio de Posgraduados. Montecillos, México. Experimental Tecomán. Libro Técnico Núm. 1. 188 p.
- FAO. 2005. <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/sb79s.pdf>. Consultada el 14 de Noviembre del 2014
- FAO. 2006. Evaluación del almacenamiento de carbono en el suelo y los principales cambios. Food and Agriculture Organization (FAO), www.fao.org/docrep/005/Y779s06.htm. Consultada el 13 de agosto del 2014.
- Faostat. 2012. Disponible en: <http://faostat.fao.org/site/613/default.aspx#ancor>. Consultada el 10 de octubre del 2014.
- Feng, G., S. F. Zhang, L. X. Li, C. Tian, C. Tang, and Z. Rengel. 2002. Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza is related to higher accumulation of soluble sugars in roots. *Mycorrhiza* 12: 185-190.
- Fernández, V., T. Eichert, V. Del Río, G. López, J. A. Heredia, A. Abadía, and A. Heredia. 2008. Leaf structural changes associated with iron deficiency chlorosis in field-grown pear and peach: physiological implications. *Plant Soil* 311: 161-172.
- Ferrol, N., J. M. Barea, and C. Azcon-Aguilar. 2002. Mechanisms of nutrient transport across interfaces in arbuscular mycorrhizas. *Plant Soil* 244: 231-237.
- Fodor, F., B. Böddi, E. Sárvári, G. Záray, E. Cseh, and F. Láng. 1995. Correlation of iron content, spectral forms of chlorophyll and chlorophyll-proteins in iron deficient cucumber (*Cucumis sativus*). *Physiol. Plant.* 93: 750-756.

- Fundación Produce Guerrero. 2012. [http://fundacionproduceagro.org.mx/wp-content/uploads/2012/05/13 Lima%B3n.pdf](http://fundacionproduceagro.org.mx/wp-content/uploads/2012/05/13_Lima%20B3n.pdf). Consultada el 13 de mayo del 2014.
- Funes F. 1975. Efectos de la quema y el pastoreo en el mantenimiento de los pastizales tropicales. *Rev. Cubana Cienc. Agric.* 9: 395 - 412.
- Gallardo J., F., S. Cuadrado S., y J. Rodríguez A. 1980. Suelos Forestales de El Rebollar (Salamanca) II. Propiedades y Conclusiones. *Anu. Cent. Edaf. Biol. Apli.* 6: 214-228.
- Gálvez V., N. Navarro, L. Otero, L. Rivero, A. Bahamonde, O. Hernández, y M. Pérez J. 2002. La degradación de suelos. Estudio de un caso. Área arrocera de Pinar del Río. En: Congreso Científico del INCA. Memorias. CD-ROM. La Habana: Instituto Nacional de Ciencias agrícolas. ISBN 959-7023-22-9.
- García R., I., M. Sánchez O., M. L. Vidal D., Y. Betancourt R., y J. Rosa L. 2010. Efecto de la compactación sobre las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de la caña de azúcar. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 19(2): 51-56.
- Giraldo L., A. 2000. Sistemas silvopastoriles para la ganadería en Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 87 p.
- González C., C., R. Ferrera C., y J. Pérez M. 1998. Biotecnología de la micorriza arbuscular en fruticultura. Universidad Autónoma de Tlaxcala y Colegio de Postgraduados. México. 131 p.
- González M., E., y E. M. Nogues. 2012. Pisoteo animal y su efecto en la densidad aparente del suelo en un *aplústol* franco arenoso bajo diferentes manejos. *Revista de Divulgación Técnica Agrícola y Agroindustrial.* 31: 1-9.

- Halliday J., and P. Somaseragan. 1983. Nodulation, nitrogen fix, and Rhizobium strain affinitis in the genus leucaena. In workshop on leucaena research in the Asian Pacific región (Singapur). Proceedings. Ottawa, Can., IDRC. pp: 27-32.
- Harley J., L., and F. Smith S. 1983. Mycorrhizal symbiosis. In: R.A. Guzmán y R. Ferrera (eds.). La endomicorriza vesículoarbuscular en las leguminosas. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México. 483p.
- Harrison M., J. 1997. The arbuscular mycorrhizal symbiosis: And underground association. Trends Plant Science 2:54-60.
- Hiderman, J, A. Makino, Y. Kurita, T. Masa, and K. Ojima. 1992. Changes in the levels of chlorophyll and light-harvesting. Physiol. 53:1209-1214.
- Hinsinger, P. 1998. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. Adv Agr 64: 225-265.
- Hopkins B., G., D. V. Jolley, and C. J. Brown . 1992. Plant utilization of iron solubilized by oat phytosiderophore. J. Plant Nutr. 15: 1599-1612.
- Horton J. H., and D. W. Newson. 1953. A rapid gas evolution for calcium carbonate equivalent in liming materials. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 17: 414-415.
- Husband R., E. Herre, and J. Young. 2002. Temporal variation in the arbuscular mycorrhizal communities colonizing seedlings in a tropical forest. FEMS Microbiology Ecology 42: 131-136.
- Ibrahim M., P. Villanueva C., F Casasola. 2007. Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y rehabilitación ecológica de paisajes ganaderos en Centro América. Arch. Latinoam. Prod. Anim. 15: 73-87.

- Iglesias J., M. 2011. Sistemas de producción agroforestales. Capacitación y análisis en: “conceptos generales y definiciones”. Rev. sist. prod. agroecol. 2(1): 151-172.
- International Council For Research In Agroforestry. 1983. Guidelines for agroforestry diagnosis and design. Nairobi, Kenya. 25 p.
- Jansa, J., A. Mozafar, G. Kuhn, T. Anken, R. Ruh, I. Sanders, and E. Frossard. 2003. Soil tillage affects the community structure of mycorrhizal fungi in maize roots. Ecol. Appl. 13: 1164-1176.
- Jaramillo R., I. 2011. La micorriza arbuscular (MA) centro de la rizosfera: comunidad microbiológica dinámica del suelo. ContacS 81: 17-23.
- Jeffries, P., and J. Barea. 1999. Arbuscular Mycorrhiza a key component of sustainable plant soil ecosystems. En: The mycota IX, fungol associations. Edition Hock. 113 p.
- Jiménez F. G., C. Ku J., y L. Ramírez A. 2002. Árboles y arbustos forrajeros de la región Maya-Tzotzil del norte de Chiapas, México. Tropical and Subtropical Agroecosystems 1: 41-46.
- Junk, A. 2000. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. In: plant roots the hidden half. Waisel, Y. and Eshel, A (Ed). Third edition.
- Kang, H., and C. Freeman. 1999. Phosphatase and arilsulphatase activities in wetland soil: annual variation and controlling factors. Soil Biol. Biochem. 22: 449-454.
- Katyal J., C., and B. D. Sharma. 1980. A new technique of plant análisis to resolve iron clorosis. Plant and Soil. 55. 105-119.
- Kenworthy, A., L. 1961. Interpreting the balance of nutrient element in leaves of fruit tres. Plant analysis and fertilizer problems. American Institute of biological Science. Washinton.DC. In: W Reuther (ed). pp: 28-43.

- Kenworthy, A., L. 1967. Plant analysis and interpretation and analysis for horticulture crops. In: soil testing and plant analysis. Part II. Soil Science Society of America. Madison, WI: 59-76
- Kernaghan, G. 2005. Mycorrhizal diversity: Cause and effect. *Pedobiologia* 49: 511-520.
- Krishnamurthy L., y M. Ávila. 1999. Agroforestería Básica. Serie textos básicos para la formación ambiental. Número 3. Editorial PNUMA. Distrito Federal de México. 337 p.
- Lee R., V., M. J. Beltrán F., J. N. Lerma M., y L. P. Licón T. 1998. Aplicación de ácido sulfúrico en el riego corrige la clorosis férrica de los cultivos en suelos calcáreos. *TERRA* 16(2): 149-161.
- Libreros H., I., L. Benavides J., D. Kass, y D. Pezo. 1994. Productividad de una plantación asociada de poró (*Erythrina poeppigiana*) y king grass (*Pennisetum purpureum* x *P. Typhoides*). Movilización de minerales. In: Árboles y Arbustos Forrajeros en América Central. Centro de Agricultura Tropical, Investigación y Enseñanza (CATIE). Informe Técnico 236 (2): 475-494.
- Loeppert, R., H., L. R. Hossner, and P. K. Amin. 1984. Formation of ferric oxihydricides from ferrous perchlorates in stirred calcareous systems. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 48: 677-383.
- López T., G. 2007. Sistemas agroforestales 8. SAGARPA. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Colegio de Postgraduados. Puebla. 8 p.
- López-Millán, A., F., F. Morales, Y. Gogorcena, A. abadía, and J. Abadía. 2001. Iron resupply- mediated deactivation of Fe deficiency stress responses in roots of sugar beet. *Aust. J. Plant Physiol* 28: 171-180.

- Lucena, J., J. 1997. Methods of diagnosis of mineral nutrition of plants. A critical review. *Acta Horticulturae* 448: 179-192.
- Machecha L. 2002. El silvopastoralismo una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Revista Ciencia Pecuaria* 15(2): 226-231.
- Malavolta E. 2006. Manual de nutrição mineral de plantas; São Paulo: Editora Agronômica Ceres. 638 p.
- Malavolta E., C. Vitti G., y A. Oliveira S. 1989. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato Piracicaba, Brazil.
- Malavolta E., C. Vitti G., y A. Oliveira S. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS. 319 p.
- Maldonado J., M., y A. Ramírez G. 1997. Efecto de la inoculación con hongos micorrizógenos en almácigos de café (*Coffea arabica*) Variedad Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Tesis, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Medellín. pp: 3 – 83.
- Maldonado T., R. 1999. El diagnóstico nutrimental en la producción de limón mexicano. Fundación Produce Michoacán y Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- Maldonado T., R., G. Almaguer V., M. E. Álvarez S., y E. Robledo S. 2008. Diagnóstico nutrimental y validación de dosis de fertilización para limón persa. *Terra Latinoamericana* 26(4): 341-349.

- Maldonado T., R., J. D. Etchevers B., G. Alcántara G., J. Rodríguez A., y M. T. Colinas R. 2001. Estado nutrimental de limón mexicano en suelos calcimórficos. *TERRA Latinoamericana* 19(002): 163-174.
- Maldonado T., R., y M. A. Vergara S. 1999. Diagnóstico nutrimental del cultivo del clavel (*Dianthus Caryophyllus*) en el Estado de México. *Memorias*.
- Maldonado-Torres, R., J. D. Etchevers B., G. Alcántar G., J. Rodríguez A., y M. T. Colinas L. 2006. Morphological changes in leaves of mexican lime affected by iron chlorosis. *J. Plant Nutr.* 29: 615-628.
- Maldonado-Torres, R., M. E. Álvarez-Sánchez., G. Almaguer-Vargas., A. F. Barrientos-Priego., y R. García-Mateos. 2007. Estándares nutrimentales para aguacatero “hass”. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 13(1): 103-108.
- Manual de prácticas. 2011. Universidad Autónoma Chapingo. Laboratorio de física de suelos. Programa educativo, Ingeniero en Recursos Naturales Renovables.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press Limited, Londres, UK. 888 p.
- Martínez L., B., y I. Pugnaire F. 2009. Interacciones entre las comunidades de hongos formadores de micorrizas arbusculares y de plantas. Algunos ejemplos en los lugares semiáridos. *Ecosistemas* 18(2): 44-54.
- Mazorra C., A. Dominguez J., y L. Medina J. 2003. Pastoreo de ovinos en huertas cítricas. Guía para productores. Ed. Domínguez J. A. Chapingo. México. 10 p.
- McBride, M., B. 1994. Environment chemistry of soils. Oxford University Press. New York.

- Medina V., M., M. Robles M., S. Becerra, J. Orozco, M. Orozco, G. Garza J., E. Ovando M., X. Chave, y A. Feliz F. 2001. El cultivo del limón mexicano. INIFAP. Libro técnico. Núm. 1. México. 188 p.
- Medina-Urrutia, V., M., M. M. Robles-González, y J. J. Velázquez-Monreal. 2009. Comportamiento de dos cultivares de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* (Christma) Swingle) en portainjertos desarrollados en suelos con dos profundidades. Revista Chapingo. Serie Horticultura 15 (1): 49-55.
- Medina-Urrutia, V., M., M. Robles-González, S. M. Becerra-Rodríguez, J. Orozco-Romero, M. Orozco-Santos, J. G. Garza-López, M. E. Ovando-Cruz, X. Chávez-Contreras, y F. A. Félix-Castro. 2001. El cultivo del limón mexicano. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo.
- Miransari, M., H. A. Bahrami, F. Rejali, and M. J. Malakouti. 2009. Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays L.*) nutrient uptake. Soil & Tillage Research 103(2): 282-290.
- Miyasaka, S., and M. Habte. 2003. Plant mechanisms and mycorrhizal symbiosis to increase phosphorus uptake efficiency. College of tropical Agriculture and Human resources, Hawaii, Honolulu. Journal 4468: 1101-1133.
- Molina E. 2000. Nutrición y fertilización del pejibaye para palmito. Informaciones Agron. 38: 1-7.
- Molina L., M., L. Mahecha L., y M. Medina S. 2005. Importancia del manejo de hongos micorrizógenos en el establecimiento de árboles en sistemas silvopastoriles. Rev Col Cienc Pec 18(2): 162-175.

- Montañés L., L. Heras., y M. Sanz. 1991. Desviación del óptimo porcentual (DOP): Nuevo índice para la interpretación del análisis vegetal. An. Aula Dei 20 (3-4): 93-107.
- Mulla, D., J., and A. B. McBratney. 2000. Soil spatial variability. In: M. E. Sumner (ed.). Handbook of soil science. CRC Press. Boca Raton, FL, USA: 321-352
- Muños M., E., C. Macías L., A. Franco R., E. Sánchez C., J. Jiménez C., y J. González G. 2009. Identificación y colonización natural de hongos micorrízicos arbusculares en nogal. TERRA LATINOAMERICANA 27(4): 355-361.
- Murgueitio R. E., C. Hernández M., M. Riascos V., C. Cuartas., F. Uribe T., y J. Lopera J. 2007. Montaje de modelos ganaderos sostenibles basados en sistemas silvopastoriles en seis subregiones lecheras de Colombia. Fundación CIPAV. Colombia.
- Murray N., R., M., J. L. Bojórquez S., A. Hernández J., M. G. Orozco B., J. D. García P., R. Gómez A., H. M. Ontiveros G., y J. Aguirre O. 2011. Efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo en un sistema agroforestal de la llanura costera norte de Nayarit, México. Revista Bío ciencias 1(3): 27-35.
- Muschler, R., G. 1994. Componente interactions. In: P.K.R. Nair., introduction agroforestry. Kluwer Academic Publishers ICRAF. Dordrech: 243-258.
- Noguera J., M., A., y J. A. Vélez L. 2011. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. Revista de ciencias agrícolas 28(1): 40-52.
- Noriega-Cantú, D., H., E. R. Garrido R., R. González M., J. Pereyda H., V. M. Domínguez M., y M. E. López E. 2012. Evaluación de dos sistemas de producción de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) en Guerrero México. Tropical and Subtropical Agroecosystems 15: 415 – 425.

- Norma Oficial Mexicana. NOM-021- SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3335/1/nom-021-semarnat-2000.pdf>. Consultada el 29 de abril del 2013:
- Novoa R., y A. Villagran. 2002. Evaluación de un instrumento medidor de clorofila en la determinación de niveles de nitrógeno foliar en maíz. *Agricultura Técnica* 62 (1): 165-171.
- Oberson, A., J. M. Besson, N. Maire, and H. Sticher. 1996. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems. *Biology and Fertility of Soils* 21: 138-148.
- Obreza, A., T., A. K. Alva, and D. V. Calvert. 1993. Citrus fertilizer management on calcareous soils. Circular 1127, Series of the Soil and Water Science Department. University of Florida. Gainesville, FL, USA.
- Obreza, A., T., A. K. Ashok, and D.V. Calvert. 1998. Citrus fertilizer management on calcareous soils. Document-CH086 University of Florida. Gainesville, FL. <http://edis.ifas.ufl.edu/scripts/htmlgem.exe?body>. Consultada el 12 de mayo del 2014.
- Olsson, P., A., I. Thingstrup, I. Jakobsen, and E. Baath. 1999. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 1879-1887.
- Osman, K. 2013. *Soils: Principles, Properties and Management*. 260 p.
- Ospina M. 2003. El páramo del Sumapaz un ecosistema estratégico para Bogotá. Sociedad Geográfica de Colombia, Academia de Ciencias Geográficas, Bogotá. 17 p.

- Pagiola S., P. Agostini, J. Gobbi, C. de Haan, M. Ibrahim, E. Murgueitio, E. Ramírez, M. Rosales, y P. Ruíz J. 2004. Pago por servicios de conservación de la biodiversidad en paisajes agropecuarios. The World Bank Environment Department. United States of America. 40 p.
- Palacios V., E. 1980. Método para estimar la tensión de humedad del suelo en función de su contenido de humedad. Boletín Técnico 14. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, Estado de México. 24 p.
- Parniske, M. 2008. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. Nature Reviews. microbiology 6: 763-775.
- PC-024-2005. Pliego de condiciones para el uso de la marca oficial “México calidad suprema” en limón mexicano.
<http://w4.siap.gob.mx/sispro/portales/agricolas/limon/PClimonmexicano.pdf>
 Consultada el 23 de febrero del 2014.
- Pérez C., A., J. Rojas S., y D. Montes V. 2011. Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el caribe colombiano. Rev. Colombiana cienc. Anim. 3(2): 366-385.
- Pérez C., A., y V. Peroza C. 2013. Micorrizas arbusculares asociadas al pasto angleton (*Dichathium aristatum Benth*) en fincas ganaderas del municipio de Tolú, Sucre-Colombia. Revista MVZ Córdoba 18(1): 3362-3369.
- Pérez E., M. Soca, L. Díaz, y M. Corso. 2008. Comportamiento etológico de bovinos en sistemas silvopastoriles en Chiapas. México. Pastos y Forrajes 31(2): 161-171.

- Pérez Z. O., y J. Orozco R. 2004. Rendimiento y concentración foliar de árboles de limón mexicano fertilizados con nitrógeno, fosforo y potasio. *TERRA Latinoamericana* 22(1): 99-108.
- Pérez Z., O. 2002. Evaluación de mejoradores del suelo en limón mexicano. *TERRA Latinoamericana* 20(3): 337-346.
- Pezo e Ibrahim. 1998. *Sistemas silvopastoriles*. Turrialba, Costa Rica, CATIE 258 p.
- Phillips, J., M., and S. Hayman D. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 55: 158-161.
- Piekielek, W., P., R. H. Fox, J. D. Toth, and E. M. Kirsten. 1995. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agronomy Journal*, 87: 403-408.
- Prasad, R., and J. F. Power. 1997. *Soil fertility management for sustainable agriculture*. Lewis Publishers. Boca Raton. New York. 356 p.
- Raddattz E. 2002. *Micorriza: el abono vivo Campo & Agro*. Zamorano, España. 15 p.
- Rajan, S., K., B. Reddy, and D. J. Bagyaraj. 2000. Screenng of arbuscular mycorrhizal fungi for their symbiotic efficeicy with *Tectona grandis*. *Forest. Ecol. Manage.* 126: 91-95.
- Ramírez A. O., S. Rebollar R., F. J. González R., J. M. Omaña S., J. A. Matus G., y A. Kido C. 2008. Situación económica de la producción de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) en los estados de Guerrero y Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Agronegocios* 22: 570-580.

- Ramírez H. 1998. Evaluación agronómica de dos sistemas silvopastoriles integrados por pasto estrella, *Leucaena* y Algarrobo forrajero. Tesis de Grado Universidad Nacional Bogotá.
- Ramírez R., W. 2005. Manejo de Sistemas Agroforestales. 11 p.
- Ramírez-Barrientos, C., E., B. Figueroa-Sandobal, V. M. Ordaz-Chaparro, y V. H. Volke-Haller. 2006. Efecto del sistema de labranza cero en un Vertisol. *TERRA Latinoamericana* 24(1): 109-118.
- Reeves W., D., P. L. Mask., C. W. Wood, and D. P. Delay. 1993. Determination of wheat nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. Influence of management practices. *J. Plant Nutr.* 16: 7781-7796.
- Rey-Obando, A., M. 2006. Utilización estratégica de biofertilizantes en la producción y calidad de árboles. En: II Curso Intensivo de Silvopastoreo. Colombia-Cuba. 16 p.
- Richard, G., I. Cousin, J. F. Sillon, A. Bruand, and J. Guerif. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: Influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.*, 52: 49-58.
- Rincón C., A., y G. A. Ligarreto. 2010. Relación entre el nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el Piedemonte Llanero Colombiano. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 11(2): 122-128.
- Rocha-Peña, M., A. 1995. Citrus tristeza virus and its aphid vector *Toxoptera citricida*. *Plant Disease* 79: 437-445.
- Rodríguez I., G. Crespo, y C. Rodríguez. 2002. Comportamiento de la macrofauna del suelo en pastizales con gramíneas naturales puras o intercaladas con *Leucaena*

- leucocephala* para la ceiba de toros. Revista Cubana de ciencia Agrícola 36(2): 181-185.
- Rombolá, A., D., W. Bruggemann, A. F. López-Millán., M. Tagliavini., J. Abadía., B. Marangoni, and R. P. Moog. 2002. Biochemical responses to iron deficiency in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*). Tree Physiology 22: 869- 875.
- Römheld V., and H. Marschner. 1991. Function of micronutrients in plant. In: J. J. Mortvedt, F. R. Cox, L. Shuman, and R. M. Welch (eds.). Micronutrients in agriculture. Soil Sci. Soc. Am. Madison, WI, USA. pp: 297-328.
- Ruiz O., P., y C. B. Davey. 2005. Micorrizas arbusculares en ultisoles de la Amazonia Peruana. Folia Amazónica 14(2): 57-74.
- Sadeghian S., M. Rivera J., y E. Gómez M. 1998. Impacto de la ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los andes de Colombia. En: Memorias de la conferencia electrónica sobre agroforestería para la producción animal en América Latina. CIPAVFAO. pp: 123-141.
- Safir, G. R., and J. M. Duniway. 1991. Evaluation of plant response to colonization by vesicular–arbuscular mycorrhizal fungi, environmental variables. En: SCHENCK, N. C. Methods and Principles of mycorrhizal research. Florida: Third printing, APS, Press. 78 p.
- SAGARPA. 2001. Norma oficial mexicana NMX-FF-087-SCFI-2001. Secretaría de Economía. Productos alimenticios no industrializados para uso humano. Fruta fresca. Limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) especificaciones. (Cancela a la NMX-FF-087-SCFI-1995). 13 p.

- SAGARPA, 2009. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Item
 i. Consultada el 12 de agosto del 2014.
- SAGARPA. 2012. Sistema de información agropecuaria de consulta (SIACON)
 Secretaria de Agricultura ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación.
www.sagarpa.com.mx. Consultada el 15 de agosto del 2014.
- Salazar G., S., G. Gutiérrez C., E. Becerra B., y J. R. Gómez A. 1993. Diagnóstico
 nutricional del mango en San Blas, Nayarit. Revista Fitotecnia Mexicana. 16:
 190-202.
- Salazar-García, S., y I. Lazcano-Ferrat. 1999. Diagnostico nutrimental del aguacate
 ‘hass’ bajo condiciones de temporal. Revista Chapingo Serie Horticultura 5: 173-
 184.
- Sanyal, S., K., and S. K. De Datta. 1991. Chemistry of phosphorus transformations in
 Soil Adv. Soil Sci. 16: 1-120.
- Saucedo-Veloz, C. 2005. Sistemas de manejo Post-cosecha de limas ácidas (limón
 ‘Persa’ y limón ‘Mexicano’. Actas del II Seminario internacional Post-cosecha
 de cítricos. Concordia entre Ríos-Argentina 17-20 de octubre. pp: 65-69.
- Saucedo-Veloz, C., y Medina-Urrutia. 2008. Problemas del manejo postcosecha y
 comercialización de limas acidas en México. En tópicos em qualidade e pos-
 colheita de frutas (org) Lenice Magali do Nascimento, José D. Negri, Dirceu de
 Mattos Junior. Campinas (Brasil): Instituto Agronómico e Fundag. pp: 93-109.
- Schmidt, W. 2006. Iron stress responses in roots of strategy I plant. In iron nutrition in
 plant and rhizospheric microorganisms. (L. L. Barton., J. Abadia (eds)). Springer.
 ISBN-10 1-4020-4712-8(HB). Netherlands. 229-250.

- Sumner M. 2000. Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 9: 8-13.
- Sumner M. 2003. *Handbook of soil science*. CRC press. Washington, DC.
- Sumner, M., E., and F. C. Boswell. 1981. Alleviating nutrient stress. In: Arking G. F. and H. M. Taylor. *Modifying the root environment to reduce crops stress*. Amer. Soc. Agr. Eng. Monograph 4.
- Sustaita R., F., V. Ordaz C., C. Ortiz S., y F. de León G. 2000. Cambios en las propiedades físicas de dos suelos de una región semiárida debido al uso agrícola. *Agrociencia* 34(4): 379-386.
- Tang, F., J. White, and I. Charvat. 2001. The effect of phosphorus availability on arbuscular mycorrhizal colonization of *Typha angustifolia*. En: *Mycologia* 93 (6): 1042-1047.
- Ting, S., V., and J. A. Attaway. 1971. Citrus fruit. In: *The biochemistry of fruit and their products*. Vol. 1. Ed. Hulme, A.C. Academic Press. London. pp: 107-369.
- Tisdale, L., S., L. Nelson, D. J. Beaton, and L. J. Avlin. 1993. *Soil Fertility and fertilizers*. MacMillan. New York.
- Torres, J., A. 2005. Effect off sheep grazing on coffe quality. En: *Silvopastoralism on Sustainable Land*. CABI Publishing. pp: 204-206.
- Toulon, V., H. Sentenac, B. J. Thibaud, C. J. Davidian, C. Moulineau, and C. Grignon. 1992. Role apoplast acidification by the H⁺ pump. Effect on the sensitivity of pH and CO₂ of iron reduction by roots of brassica napos L. *Planta* 186: 212-218.
- Turner, F., T., and M. F. Jund. 1991. Chlorophyll meter to predict nitrogen topdress requirement for semiwardf rice. *Agron J.* 83: 926-928.

- Ulrich, A. 1948. Plant Analysis Methods and interpretation of results. In: The American Potash Institute. Diagnostic techniques for soil and crops. Washington: 157-198.
- Ventura U., F., S. Salgado G., M. Castelán E., D. Palma L., M. C. Rivera C., y P. Sánchez G. 2012. Métodos de interpretación del análisis nutrimental en naranja valencia (*Citrus cinensis* L. Osbeck). Terra Latinoamericana 30(2): 139-145.
- Vieira, J., N., C., S., M. I. Massanori, N. M. Colauto, C. de Conti, A. V. Borgues, S. H. Okumoto, R. H. C. Lee, and K. T. Hernández. 2004. Root distribution of rootstocks for 'Tahiti' lime. Sci. Agric. 61 (1): 94-99.
- Zavala V. F., M. Sandoval V., M. E. Álvarez S., M. T. Colinas L., R. Maldonado T., y P. Ramírez V. 2011. Cambios morfológicos y fisiológicos en hojas de frijol tolerante y susceptible a deficiencia de hierro. Terra Latinoamericana 29(3): 267-276.