



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN DE SUELOS

**MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA PARA EL
DESARROLLO SOSTENIBLE**

TESIS

**MANEJO NUTRIMENTAL DEL CULTIVO DE PIMIENTA
GORDA ASOCIADO CON YUCA EN TUXTEPEX, OAXACA**

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:

JEAMY FABIOLA RICO GUEVARA

CHAPINGO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

JULIO, 2011.



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





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN SUELOS
MAESTRÍA EN AGROFORESTERÍA PARA
EL DESARROLLO SOSTENIBLE

La presente tesis titulada **MANEJO NUTRIMENTAL DEL CULTIVO DE PIMIENTA GORDA ASOCIADO CON YUCA EN TUXTEPEX, OAXACA**, realizada por la C. Jeamy Fabiola Rico Guevara, bajo la dirección del Comité Asesor, ha sido revisada y aprobada por el mismo como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
EN AGROFORESTERIA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

COMITÉ ASESOR

Director 
Dr. Ramiro Maldonado Torres

Asesor 
Dr. Antonio Vázquez Alarcón

Asesor 
Dra. Elizabeth Hernández Acosta

Chapingo, Texcoco, Estado de México, Julio 2011.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, que me cobijó durante tantos años, hasta llegar a este día, y donde me forjé como profesionalista.

Al Departamento de Suelos, que fue prácticamente mi casa por casi 9 años, contando la Ingeniería.

A la Coordinación de la Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, por las facilidades otorgadas para la terminación de este documento.

Al Dr. Ranferi Maldonado Torres, por su dedicación y dirección a lo largo de este proceso.

Al Dr. Antonio Vázquez Alarcón, por sus correcciones oportunas y adecuados puntos de vista.

A la Dra. Elizabeth Hernández Acosta, por su disponibilidad para colaborar en este proyecto.

En general, a todos los involucrados que participaron en la realización de la tesis. Mil gracias a todos ellos.

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios, mi Señor, que me ha guiado y acompañado en cada paso de mi vida, y me ha tomado de la mano aún sin merecerlo. Por llenarme de bendiciones y permitirme concluir una más de mis metas, la cual comparto hoy con mis seres más amados y preciados, que precisamente él colocó en el lugar y momento indicado.

A mis adorados padres, Rosita y Rubén, mi mayor motivación e inspiración en la vida, mis mentores, de quienes he aprendido todo lo que soy, quienes me han sabido aconsejar y orientar en los momentos más difíciles. Quienes me han llenado de amor, y me han sabido transmitir sus aprendizajes, a fin de que yo tropiece lo menos posible, y si lo hago, tenga la fortaleza para levantarme. Muchas gracias papitos hermosos. Los amo.

A cada uno de mis hermanos; Tere, Paty, Pera, Chío, Rubén, Ale, Poncho, de los cuales tengo mucho que aprender, y a los que agradezco formen parte de mi familia. Muchas gracias a todos ustedes, por el apoyo y amor recibido. Los quiero muchísimo. Alito, especialmente a ti, que has sido como mi segunda mamá, que me has cuidado y ayudado en todo lo que has podido, y me has mostrado que pase lo que pase, estarás ahí para mí, Te quiero muchísimo hermanita.

A mis amigos y personas que estuvieron conmigo desde el inicio de este paso: especialmente a Almita, Daniel (Zurdito), July (hermanita), que a lo largo del camino, estuvieron alentándome, apoyándome, brindándome su amistad sincera, y tendiéndome la mano en momentos duros. En verdad les agradezco de corazón que hayan estado conmigo. Los quiero mucho.

A todos aquellos que se involucraron en mi vida recientemente y me han ayudado en muchos aspectos, gracias por su apoyo y amistad, y a las personas que ahora forman parte de mi presente, y que de aquí en adelante deseen compartir este y muchos más logros, si Dios me lo permite, estaré feliz de que así sea.

Esto es por mí, y por ustedes.

Mil gracias por todo. Los adoro a todos.

RESUMEN

MANEJO NUTRIMENTAL DEL CULTIVO DE PIMIENTA GORDA ASOCIADO CON YUCA EN TUXTEPEX, OAXACA

Por: Jeamy Fabiola Rico Guevara

Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible

Universidad Autónoma Chapingo

Bajo la dirección del Dr. Ranferi Maldonado Torres

Julio, 2011

En México, la Pimienta dioica se encuentra como monocultivo, pero sus rendimientos (0.5 a 3 t ha^{-1}) están por debajo de su potencial productivo. En cambio, en la región de estudio, se obtienen alrededor de 6 t ha^{-1} , cifra mucho mayor a las reportadas. Por tal motivo, esta investigación tuvo como objetivo evaluar las ventajas y efectos nutrimentales provocados por la asociación de pimienta dioica con yuca como un sistema agroforestal de alto rendimiento. Conociendo sus interacciones se puede determinar el aprovechamiento nutrimental entre ambos cultivos, y de ser necesario, proponer una dosis de fertilización que favorezca la absorción nutrimental y buen desarrollo de estos.

Se colectaron 25 muestras de tejido vegetal de los árboles con mayor vigor, así como 25 submuestras de suelo de 50 gramos cada una. Posteriormente, las submuestras de suelo se mezclaron homogéneamente y se tomaron 350

gramos, para su análisis en laboratorio, previa preparación en cuanto a secado, molienda y tamizado.

Los resultados del análisis de suelos muestran: pH ligeramente ácido (5.15), pobre en materia orgánica, con concentraciones deficientes de N inorgánico, P, K, Mn y B, de bajas a deficientes de Ca, Zn, Cu, de medias a bajas de Mg y de altas a medias de Fe.

Haciendo la relación entre la cantidad de nutrientes del suelo y lo extraído por los cultivos, se estableció la deficiencia nutrimental del suelo y la cantidad faltante a aportar. El P, K, Ca y Mg fueron los nutrientes que se encuentran en perfecto balance, mientras que el N, Fe, Mn, Zn, Cu y B resultaron ser los deficitarios, los cuales deberán aportarse por medio de fertilización.

Así, estos resultados permitirán redefinir la forma de fertilización para favorecer la nutrición de la pimienta, para que el manejo de esta variable redunde en mayores rendimientos y calidad del fruto.

Palabras clave: asociación, fertilización, nutrición.

ABSTRACT

By: Jeamy Fabiola Rico Guevara

NUTRIMENTAL MANAGEMENT OF THE ALLSPICE CROP ASSOCIATED WITH CASSAVA IN TUXTEPEX, OAXACA

July, 2011.

Under the direction of Dr. Ranferi Maldonado Torres.

In Mexico, *Pimenta dioica* (commonly known as allspice in English) is found as a monoculture, but its yields (0.5 to 3 t ha⁻¹) are below its productive potential. By contrast, in the study area, we obtained yields of about 6 t ha⁻¹, a figure much higher than those reported. Therefore, the objective of this study was to evaluate the benefits and nutritional effects caused by the association of *Pimenta dioica* with cassava as a high-yield agroforestry system. By knowing their interactions, we can determine the nutrient utilization between the two crops, and if necessary, propose a fertilizer dosage that promotes proper nutrient absorption and good development in both plants.

We collected 25 plant tissue samples from the more vigorous trees, and 25 soil subsamples of 50 grams each. Subsequently, the soil subsamples were homogeneously mixed and 350 grams of the resulting mix were dried, ground and sieved prior to laboratory analysis.

The soil test results showed: slightly acid pH (5.15), poor in organic matter, with deficient concentrations of inorganic N, P, K, Mn and B, low to deficient Ca, Zn, Cu, medium to low Mg and high to medium Fe.

Using the relationship between the amount of nutrients in the soil with that removed by the crops, soil nutrient deficiency and the amount lacking that must be provided were determined. The nutrients P, K, Ca and Mg were found in perfect balance, while N, Fe, Mn, Zn, Cu and B were deficient, which means that fertilizer must be used to make up for the deficit.

Thus, these results will allow redefining the fertilization strategy for nourishing the allspice tree, so that the management of this variable results in higher yields and fruit quality.

Keywords: association, fertilization, nutrition.

CONTENIDO

	PAG.
INDICE DE CUADROS	iv
INDICE DE FIGURAS	v
I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS	2
Objetivo general.....	2
Objetivos particulares	2
III. JUSTIFICACION	3
IV. MARCO TEORICO	4
4.1 Asociación de cultivos	4
4.2. Competencia	7
4.2.1 Competencia entre plantas	7
4.2.2. Proceso de competencia por nutrientes.	8
4.2.3 Crecimiento dependiente de los nutrientes y competitividad	9
4.2.4 Modelos complejos de competencia por nutrientes	14
4.3. Sistema agroforestal.....	17
4.4. Disponibilidad de nutrientes en el suelo	18
4.5. Nutrición mineral.....	19
4.5.1. Factores que influyen en la absorción de nutrientes.....	20
4.6. Área de exploración radicular	22
4.7. Cultivo de la Yuca (<i>Manihot sculenta crantz</i>).....	24
4.7.1. Características de la planta de Yuca.....	25
4.7.2. Requerimientos ambientales.....	27
4.7.3. Requerimientos nutrimentales	29
4.8. Cultivo de la Pimienta Gorda (<i>Pimienta dioica</i>)	29
4.8.1 Características del cultivo de Pimienta	30
4.8.2. Requerimientos ambientales.....	32

4.8.3. Requerimientos nutrimentales	33
4.8.4. Producción y exportación	34
4.9. Descripción de la zona de estudio	34
4.9.1. Localización	35
4.9.2. Orografía	35
4.9.3. Hidrografía	36
4.9.4. Clima	36
4.9.5. Principales Ecosistemas	36
4.9.6. Recursos Naturales.....	36
4.9.7. Características y Uso del suelo.....	36
V. METODOLOGÍA.....	37
5.1. Análisis de suelo.....	37
5.2. Análisis foliar	37
VI: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
6.1. Diagnóstico nutrimental del suelo	41
6.2. Funciones de los nutrientes	50
6.2.1. Función del nitrógeno (N).....	50
6.2.2. Función del hierro (Fe).....	51
6.2.3. Función del manganeso (Mn)	52
6.2.4. Función del zinc (Zn).....	52
6.2.5. Función del cobre (Cu).....	53
6.2.6. Función del boro (B).....	53
6.3. Propuesta de fertilización	54
6.3.1. Nitrógeno	54
6.3.2. Hierro	55
6.3.3. Manganeso	55
6.3.4. Zinc	56
6.3.5 Cobre	56

VII. CONCLUSIONES.....	57
VIII. LITERATURA CITADA	59

INDICE DE CUADROS

PAG.

CUADRO 1. DEFINICIONES DE VARIABLES USADAS EN LAS ECUACIONES PARA R^* PARA LOS 5 MODELOS	13
CUADRO 2 PRINCIPALES REGIONES PRODUCTORES DE YUCA	28
CUADRO 3. NIVELES CRÍTICOS DE NUTRIMENTOS EN EL CULTIVO DE YUCA	29
CUADRO 4. PRODUCCIÓN DE PIMIENTA VERDE EN MÉXICO 1999-2005 (TONELADAS)	32
CUADRO 5. PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE PIMIENTA (MILES DE TONELADAS) ..	34
CUADRO 6. PRINCIPALES PAÍSES EXPORTADORES DE PIMIENTA (MILES DE TONELADAS)	34
CUADRO 7. CLASIFICACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN EL SUELO.....	41
CUADRO 8. CONCENTRACIÓN Y NUTRIENTES DISPONIBLES EN EL SUELO	44
CUADRO 9. DISTINTOS MECANISMOS DE LLEGADA DE LOS NUTRIENTES HASTA LA CERCANÍA DE LAS RAÍCES EN UN CULTIVO DE MAÍZ CON UN RENDIMIENTO DE 9,5 TN HA ⁻¹ . VALORES EN KG HA ⁻¹ PARA CADA NUTRIENTE	46
CUADRO 10. MANEJO NUTRIMENTAL DE LA YUCA.....	48
CUADRO 11. DEFICIENCIA DE NUTRIENTES EN YUCA	48
CUADRO 12. CLASIFICACIÓN NUTRIMENTAL DEL FOLLAJE DE PIMIENTA GORGA	49
CUADRO 13. MANEJO Y DEFICIENCIA NUTRIMENTAL DE LA PIMIENTA GORDA.....	49
CUADRO 14. DÉFICIT NUTRIMENTAL TOTAL (KG)	50
CUADRO 15. ÍNDICE DE ENCALADO.....	54

INDICE DE FIGURAS

	PAG.
FIGURA 1. ABSORCIÓN DE NUTRIENTES EN LAS PLANTAS.....	7
FIGURA 2. EFECTO DEL PH EN LA DISPONIBILIDAD NUTRIMENTAL DE LOS SUELOS.....	19
FIGURA 3. VARIACIÓN DEL SISTEMA RADICULAR ENTRE ESPECIES	23
FIGURA 4. FLOR DEL CULTIVO DE YUCA.....	25
FIGURA 5. FLOR DEL CULTIVO DE PIMIENTA GORDA	30
FIGURA 6. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE <i>PIMENTA DIOICA</i> EN EL NEOTRÓPICO	31
FIGURA 7. MAPA DE TUXTEPEC, OAXACA	35
FIGURA 8. PLANTACIÓN DE PIMIENTA GORDA.....	41
FIGURA 9. PIMIENTA DIOICA EN EL HUERTO EN ESTUDIO.....	47

I. INTRODUCCION

En muchos lugares del mundo, especialmente en los países en desarrollo, los agricultores realizan las siembras de manera combinada (policultivos o cultivos intercalados), más que en cultivos de una sola especie (monocultivos o cultivos aislados). Hasta hace unos veinte años, los investigadores agrícolas, ignoraban las características de los policultivos. Sin embargo, recientemente, las investigaciones acerca de los policultivos ha incrementado y muchos de los beneficios potenciales de estos sistemas se han hecho evidentes (Liebman, 1997).

Los policultivos se pueden implementar cuando al agricultor le interesa el rendimiento de un cultivo principal y desea usar otra especie como un seguro contra siniestros, control de malezas, mejora de la fertilidad del suelo, u otros propósitos.

Tal es el caso de la asociación de pimienta gorda con yuca en la región de Tuxtepec, Oaxaca, donde la yuca solo es cultivada con el fin de aprovechar el espacio y el recurso suelo entre las hileras del cultivo de pimienta, mientras esta última alcanza el crecimiento y desarrollo suficiente para entrar al proceso de producción y comercialización.

II. OBJETIVOS

Objetivo general:

- Realizar un diagnóstico nutrimental del suelo, así como de la extracción de nutrientes dada por la asociación de pimienta gorda con yuca como un sistema agroforestal de alto rendimiento.

Objetivos particulares:

- Evaluar si la asociación de pimienta gorda con yuca resulta redituable desde el punto de vista productivo, tomando como variable al rendimiento.
- Proponer una dosis aproximada de fertilización que favorezca la absorción nutrimental y buen desarrollo de los cultivos asociados.

III. JUSTIFICACION

Cuando se establecen sistemas de cultivos asociados es importante evaluar el nivel de interacción y de competencia entre las especies que aprovechan el mismo espacio, recurso suelo, radiación, agua, entre otros. Por tal motivo, esta investigación pretende realizar esta evaluación y así determinar el nivel de competencia nutrimental entre los dos cultivos en cuestión, con el fin de hacer las aplicaciones de nutrientes necesarios y suficientes para disminuir el nivel de competencia, y con esto, garantizar y promover el máximo rendimiento y la calidad del producto de interés en la cosecha.

IV. MARCO TEORICO

4.1 Asociación de cultivos

Los sistemas de policultivos tienen su origen en una agricultura de subsistencia, dirigida al máximo aprovechamiento del espacio agrícola y su práctica se ha desarrollado históricamente entre los campesinos con carencia de recursos e insuficiente disponibilidad de superficie de labranza. Los sistemas de policultivos tienen su origen en los mismos inicios de la agricultura, como parte de las culturas indígenas y sus saberes (Gutiérrez-Martínez *et al.*, 2007).

Los policultivos pueden comprender combinaciones de cultivos anuales con otros anuales, anuales con perennes o perennes con perennes (Liebman, 1997). Por tal motivo, existe la necesidad de tener un conocimiento más profundo de los componentes bióticos y de las interacciones que se dan en el complejo sistema de cultivos asociados, a fin de diseñarlos y manejarlos ventajosamente (Gleissman, 1986).

Dentro de estas interacciones, una de las más importantes es la absorción y asimilación nutrimental presente en los sistemas de cultivos asociados. La nutrición de plantas se refiere a las necesidades y usos de los elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo. La importancia de la nutrición mineral en la calidad y cantidad del crecimiento en las plantas está bien establecida. Se basa en el criterio de “esencialidad”, en el que se establece que las plantas requieren de al menos 17 elementos químicos que son indispensables para su crecimiento y desarrollo, y se fundamentan en los tres criterios de esencialidad:

a. La omisión de cualquiera de los elementos debe resultar en un crecimiento anormal de la planta, en la incapacidad para completar todas las fases del ciclo de vida, o en la muerte prematura de esta.

b. La función del elemento debe ser específica, y no puede ser reemplazada por algún otro elemento.

c. El elemento debe ejercer un efecto directo en el crecimiento y desarrollo de la planta, como constituyente o como activador de procesos metabólicos.

De acuerdo con esta definición, los elementos minerales que tengan efectos indirectos en el crecimiento de las plantas, no son considerados como esenciales. Han sido identificados trece elementos esenciales para el crecimiento de plantas superiores, aunque se ha probado que el cloro es esencial sólo para un número limitado de especies. Las plantas requieren de al menos 17 elementos esenciales para su crecimiento y desarrollo. Los elementos carbono (C), hidrógeno (H) y Oxígeno (O) se consideran como no minerales y son absorbidos principalmente del agua y del aire. Estos tres elementos se combinan químicamente en el proceso de fotosíntesis para formar carbohidratos (Marschner, 1995).

Dentro de la asociación de cultivos pueden existir sinergismos o antagonismos en cuanto a la absorción de nutrientes, debido a que la presencia de algún cultivo demande más nutrimentos que el otro, y beneficie o perjudique el desarrollo del otro.

En los policultivos se pueden manifestar cambios en la partición de los recursos, de manera tal que, los mayores porcentajes del total de nutrientes y

materia seca se almacenan en la parte de tejido u órgano que se cosecha, respecto a cultivos que se desarrollan separadamente (Willey 1990).

Los policultivos compuestos de especies con patrones de raíces espaciales complementarias pueden explotar un mayor volumen de suelo y tener un mayor acceso a nutrientes relativamente inmóviles como el fósforo. Los policultivos constituidos por especies que tienen patrones complementarios y temporales de crecimiento radicular y absorción de nutrientes, pueden capturar más nutrientes si éstos están continuamente disponibles debido a procesos de mineralización (Liebman, 1997).

Respecto a la pimienta gorda, cuyo crecimiento es perenne, generalmente se maneja como monocultivo, sin embargo, en algunas ocasiones se le ha cultivado en forma asociada, sobre todo en fincas cafetaleras. Por su demanda comercial, adaptabilidad a diversos tipos de suelo, facilidad de manejo y costos bajos de producción, su adopción tiende a crecer entre los productores cafetaleros (Ruíz *et. al.*, 1999). En cuanto a la yuca, que es un arbusto perenne de tamaño variable, que puede alcanzar los 3 m de altura, ha sido asociada con algunos cultivos, como lo es con frijol y maíz, estableciéndose con más frecuencia en sistemas de cultivos asociados.

Dentro de esta temática, para conocer en detalle si en una asociación de cultivos existe competencia o beneficio desde el punto de vista de absorción de nutrientes, es imprescindible saber en primer término el nivel de concentración de nutrientes existente en el suelo, así como su disponibilidad.

4.2. Competencia

4.2.1. Competencia entre plantas

Existen dos mecanismos principales de competencia entre plantas: competencia por los recursos y la competencia por interferencia (principalmente alelopatía). La competencia por recursos puede subdividirse en competencia por los recursos del suelo y la competencia por la luz (Tilman, 1988). Si las plantas están compitiendo por los recursos limitantes del suelo, la teoría puede desarrollarse en el aspecto de que potencialmente puede predecir la dinámica y el resultado de sus interacciones (Tilman, 1982). Mediante esto se podría establecer la dependencia de los recursos en el crecimiento y la reproducción de cada especie, la dinámica de la oferta de recursos, y las tasas de consumo de nutrientes de la especie. Tal teoría es mecanicista, ya que incluye directamente el compuesto intermedio, el recurso, que es la entidad de la que una planta individual afecta a otra planta.

Enfoques similares se pueden desarrollar para alelopatía o cualquier otro mecanismo de interacción interespecífica. Un modelo de los mecanismos de alelopatía tendría que incluir la tasa a la cual los individuos generan el compuesto alelopático, los efectos del compuesto en el crecimiento, supervivencia y/o reproducción, y la tasa de pérdida o deterioro del compuesto. Hay numerosas razones para afirmar que la competencia de plantas puede ser compleja. Las plantas son morfológicamente, fisiológicamente, y genéticamente diferentes y los recursos de los que se nutre son espacial y temporalmente

irregulares. Las habilidades de las plantas para adquirir los recursos y las cantidades necesarias para su supervivencia, crecimiento y reproducción, se ven influidas por los mutualistas, los agentes patógenos, depredadores y herbívoros (Park *et. al.*, 2002).

La dinámica de la oferta de recursos, tales como la tasa de reciclado de nitrógeno, está influenciada por las características de la competencia entre plantas.

Los modelos se desarrollan de manera que los parámetros que se cree son de mayor importancia se incluyan explícitamente. Otros factores se integran de manera indirecta, en la medida en que los parámetros del modelo son abstractos. Esto plantea otro problema potencial con modelos fenomenológicos basados en la densidad de la competencia. Su fracaso para incluir directamente hasta los más simples mecanismos de competencia por los recursos significa que pueden tener grandes dificultades para abstraer la complejidad de cualquier orden superior de la competencia por los recursos (Gliessman, 1986).

4.2.2. Proceso de competencia por nutrientes

Existen cinco modelos de competencia por nutrientes, algunos abstractos y otros realistas. Mediante la comparación de estos modelos, se puede ver cómo los distintos rasgos de las plantas determinan la habilidad competitiva por nutrientes (Tilman, 1988).

Por otra parte, estos modelos sugieren un solo valor, empíricamente observable, R^* (Competencia), que puede integrar el efecto total de todas las

características de las plantas sobre la capacidad competitiva por nutrientes. R^* puede proporcionar una manera simple pero de gran alcance para predecir el resultado de la competencia interespecífica por los nutrientes (Gleissman, 1986).

4.2.3. Crecimiento dependiente de los nutrientes y competitividad.

Es el modelo mecanicista más simple de competencia por nutrientes limitantes en el factor suelo, que utiliza el efecto total e integrado de los nutrientes limitantes en la dinámica de población de plantas, y el efecto del crecimiento de las plantas sobre la disponibilidad de los nutrientes (Gleissman, 1986). En un experimento donde se utilizaron algas de agua dulce, este modelo predijo correctamente el resultado de la competencia por fosfatos y silicatos.

Muchos ecologistas han aceptado que un modelo tan sencillo, que era fisiológicamente "realista" para las algas, podría predecir correctamente el resultado de la competencia en las plantas, que son organismos morfológicamente más complejos. Sin embargo, un segundo modelo, que era fisiológicamente más realista, hizo predicciones menos exactas, tal vez porque, con más parámetros, existía mayor error total en su estimación.

En su forma más general, este modelo simple establece la unidad de la tasa de cambio de la biomasa de una población (que es $dB / dt \times 1 / B$, o $dB / B dt$ /, que a menudo se llama "*tasa de crecimiento relativo*", o TCR) depende de la diferencia entre su función de crecimiento dependiente de recursos netos, $f(R)$, y su tasa de pérdida, m .

Aquí m es asumido para ambos, recursos y densidad independiente. Cualquier dependencia de la pérdida de recursos se incluye en $f(R)$, ya que $f(R)$ da el efecto neto de los recursos en la tasa de crecimiento relativo. Hay una ecuación para cada especie, i , que dice:

Tasa de cambio de biomasa = crecimiento – pérdida

$$dB_i / B_i dt = f_i (R) - m_i \quad (1)$$

La dinámica del recurso que limita el crecimiento, R , dependerá de la diferencia entre la función de oferta de recursos, $y(R)$, y el consumo de recursos agregado para todas las especies: tasa de cambio del recurso = tasa de suministro - suma de las tasas de consumo.

$$dR/dt = y(R) - \sum_{i=1}^n [Q_i B_i f_i (R)] \quad (2)$$

Donde Q_i , es el contenido de nutrientes por unidad de biomasa de la especie i y n es el número total de especies consumidoras.

La expresión “consumo” multiplica la cantidad de nueva biomasa producida durante un instante, $B_i f_i(R)$ por el contenido de nutrientes por unidad de biomasa de la especie, Q_i , para obtener la tasa de consumo total de cada especie.

Este modelo general puede ser resuelto para determinar qué especies deben persistir y que deberá orientarse a la exclusión de la población y la dinámica de los recursos, una vez alcanzado el equilibrio. Una vez hecho esto, se comprueba que el parámetro crítico es R^* . Cada especie tiene su propio R^* .

R^* es el nivel al cual la concentración de la forma disponible del recurso limitante se reduce en un monocultivo una vez que el monocultivo ha alcanzado el equilibrio, es decir, una vez que ha alcanzado su capacidad de carga.

Expresado de otra manera, R^* es la concentración del recurso en el que la tasa de crecimiento de una especie es igual a la tasa de pérdida y la tasa de consumo de la especie es igual a la tasa de suministro de nutrientes al hábitat. Por lo tanto, R^* es la concentración de los recursos disponibles que una especie necesita para sobrevivir en un hábitat.

Si la concentración es superior al R^* , el tamaño de la población de especies aumentaría. Si fuera menor, el tamaño de la población disminuiría. R^* También mide el efecto de una especie en el recurso limitante, y por lo tanto a sus competidores. Cuanto menor es el R^* de una especie, mejor es su capacidad competitiva para el recurso limitante. Si todas las especies están limitadas por el mismo nutriente, la especie con el más bajo R^* se prevé, en el equilibrio, a desplazar a todos los competidores. De la ecuación. (1), puede calcularse que el R^* es:

$$R_i^* = f_i^{-1}(m_i) \quad (3)$$

Donde f^{-1} es la función inversa de f .

Para hacer esto más concreto, vamos a considerar un modelo en particular. Los estudios experimentales han demostrado que la función de crecimiento dependiente de recursos, $f_i(R)$, es a menudo una función de

saturación que monótonamente se acerca a un valor máximo a medida que aumenta R . Una forma común de la función de crecimiento es

$$f_i(R) = r_i R / (R + K_i) \quad (4)$$

Que es el modelo Monod (1950). En este modelo, r_i es la tasa máxima de saturación del recurso por unidad de biomasa de la especie i y K_i es la concentración del recurso a la cual la especie i alcanza una tasa de crecimiento por unidad de biomasa igual a la mitad de la tasa de crecimiento máximo. Sustituyendo de $f(R)$ se tiene:

$$\text{Modelo 1: } R_i^* = m_i K_i / (r_i - m_i) \quad (5)$$

De esta ecuación se desprenden algunas conclusiones importantes en el proceso de competencia por un nutriente limitante.

En primer lugar, pone de manifiesto que la capacidad competitiva de una especie depende de m , es decir, la herbivoría, las enfermedades, y otras fuentes de pérdida. Cuando m es aproximadamente igual a r , una disminución en la tasa de pérdida provoca un gran aumento de la capacidad competitiva (es decir, una gran disminución en R^*), pero m tiene un mucho menor efecto en la capacidad competitiva cuando m es mucho menor que r . Del mismo modo, cuando r , es casi igual a m (y r debe ser mayor que m para que una planta para sobrevivir), los pequeños aumentos en r causan una gran aceleración en la capacidad competitiva (Tilman, 1988).

Este modelo es simple, sin embargo se podría argumentar que omite elementos esenciales de la biología de las plantas que están directamente relacionados con la capacidad competitiva. Por ejemplo, no incluye ni tasa de absorción de nutrientes o tasa de crecimiento que depende de la concentración de nutrientes en el tejido, ni incluye la reabsorción de nutrientes antes de que las hojas senescentes se caigan, tampoco incluye la distinción entre raíces y brotes (Chapin, 1980).

Cuadro 1. Definiciones de variables usadas en las ecuaciones para R^* para los 5 Modelos

Modelo 1
<i>r</i> : Tasa de crecimiento máximo
<i>K</i> : Constante media de saturación para nutrientes limitantes
<i>m</i> : Tasa de pérdida (todas las causas)
Modelo 2
<i>r</i> : Tasa de crecimiento máximo
<i>h</i> : Mínima concentración de nutrientes en el tejido requerida para la sobrevivencia de la planta
<i>k</i> : Constante media de saturación de absorción de nutrientes de Michaelis-Menton
<i>m</i> : Tasa de pérdida de tejido vegetal
<i>v</i> : Tasa máxima de absorción de nutrientes por unidad de biomasa de la planta
Modelo 3
Los mismos parámetros del Modelo 2, y
<i>b</i> : La proporción entre biomasa de la planta y la raíz
Modelo 4
Los mismos parámetros del Modelo 2, excepto <i>m</i> , y
<i>s</i> : La tasa a la cual las plantas pierden sus hojas senescentes
<i>c</i> : Tasa de pérdida total para todas las fuentes de pérdida que no sea incluidas en <i>s</i> , así, $s + c$ del Modelo 4 es similar a <i>m</i> del Modelo 2 y 3
<i>q</i> : Proporción de nutrientes del tejido vegetal que es perdida desde la planta cuando el tejido se cae
Modelo 5
Los mismos parámetros del Modelo 4, excepto <i>q</i> , y
<i>M</i> : La concentración de nutrientes en tejido senescente cuando estas hojas se caen

4.2.4. Modelos complejos de competencia por nutrientes

Un segundo modelo es de Michaelis-Menten, que incluye explícitamente la absorción de nutrientes dependiente de los recursos, la concentración de nutrientes en el tejido y el crecimiento que depende de la concentración de nutrientes en el tejido. Sus parámetros se definen en el Cuadro 1. Cuando este modelo se resuelve, se comprueba que la especie competitiva dominante, en el equilibrio, es la especie con el más bajo R^* , donde R^* es:

$$\text{Modelo 2: } R^* = rhkm[v(r - m) - rhm] \quad (6)$$

Todas las variables en la ecuación. (6) se refieren a los rasgos de una especie o de un grupo de individuos genéticamente idénticos. Por lo tanto, R^* , y todas las variables, pueden ser indexadas con una i , para las especies i . Al igual que antes, R^* depende de todos los parámetros del modelo. R^* incorpora directamente la respuesta de una especie a niveles de recursos (h y r son parámetros que describen cómo el crecimiento depende de los niveles de nutrientes en el), los efectos de una especie en el recurso limitante (v y k son parámetros de absorción de nutrientes), y el efecto de diversas fuentes de pérdida, la herbívora y la mortalidad (m) sobre la capacidad competitiva.

La capacidad competitiva es mayor (es decir, R^* se reduce) por los rasgos que aumentan r y v , y por los rasgos que disminuyen m , h , y k . El Modelo 2 puede ser modificado nuevamente, cuando se trata de hojas o raíces, debido a que funcionalmente son distintos. Cuando se hace esto, y el modelo se resuelve para determinar el resultado de equilibrio de la competencia de un

único recurso limitante, la resultante R^* para este modelo es el Modelo 3, el cual se expresa de la manera siguiente:

$$\text{Modelo 3: } R^* = rhkm[vb(r - m - rb) - rhm] \quad (7)$$

En este caso, b es la proporción de la biomasa vegetal en la raíz (biomasa por debajo del suelo). El resto de la biomasa vegetal es asumida como la hoja, pero esta hipótesis podría fácilmente ser modificada. Para facilitar la comparación con el Modelo 2, la tasa máxima de absorción, v , sigue siendo expresado en la tasa de absorción por unidad de biomasa total de la planta.

R^* otra vez depende de todos los parámetros del modelo, y la fórmula para R^* incorpora explícitamente los efectos de estos parámetros para predecir la capacidad competitiva.

Comparación de las ecuaciones. (6) y (7) muestra cómo el Modelo 2, que no incluye explícitamente la raíz y la hoja de la biomasa, es una simplificación del Modelo 3. R^* tiene un valor mínimo para un valor intermedio de b (asignación de raíz). Este nivel óptimo de asignación a las raíces depende de las características de la planta.

El Modelo 2 también puede ser modificado mediante la adición de (1) reabsorción de nutrientes de las hojas que han caído, (2), las tasas propias de cada especie de las hojas caídas (es decir, diferentes grados de la longevidad de raíz y de hoja perenne), y (3) reabastecimiento de nutrientes que depende de la cantidad de hojarasca que una planta produce. El modelo resultante, Modelo 4, tiene un R^* de:

$$\text{Modelo 4: } R^* = rhk(c + sq)/[v(r - c - s) - rh(c + sq)] \quad (8)$$

En este caso, q es la proporción de nutrientes de las plantas que se pierden cuando los tejidos senescentes se desprenden, s es la velocidad a la que se desprenden, y c es la tasa de pérdida y la muerte por todas las otras causas (herbívora, enfermedad, etc.) Hay que tener en cuenta que la pérdida de tejido en la senescencia es dañina, si los tejidos contienen nutrientes, y los daños incrementan con una gran cantidad de nutrientes perdidos.

La pérdida de tejido para los herbívoros sería aún más perjudicial que la indicada en la ecuación (8) si los herbívoros eligieran tejidos vegetales más ricos en nutrientes, que a menudo es el caso

El Modelo 4, supone que una planta extrae una proporción fija del nutriente limitante de sus tejidos senescentes antes de que el tejido vegetal se convierta en hojarasca. Una formulación alternativa, algo más complejo matemáticamente, asume que hay un nivel particular en el que una planta reduce la concentración foliar antes de que los tejidos se desprenden. Esta formulación, denominada Modelo 5, da un valor para R^* de:

$$\text{Modelo 5: } R^* = rhk[c + sM(r - c - s) / - rh] /$$

$$[v(r - c - s) rh [c + sM(r - c - s)/rh]] \quad (7)$$

Aunque esta ecuación puede parecer engorrosa, la inspección de sus términos muestra que está estrechamente relacionada con las ecuaciones de R^* de los modelos 2, 3 y 4. Hay que tener en cuenta que la principal diferencia entre esta ecuación y la ecuación (8) es que la q de la ecuación (8) se sustituye por $M(r - c - s)/rh$. Este último término es la proporción de nutrientes que pierde la planta cuando los tejidos se desprenden. La ecuación (9) ilustra la relación

cuantitativa entre los rasgos de las plantas y la predicción de su capacidad competitiva (Grace *et. al.*, 1990).

4.3. Sistema agroforestal

Desde hace muchos años, la Agroforestería ha sido mencionada como una forma de asociación de cultivos, y se define como el cultivo deliberado de árboles en la misma unidad de tierra que los cultivos agrícolas y/o la cría de animales, ya sea en forma de mezcla espacial o en secuencia temporal. Debe existir una interacción significativa entre los elementos arbóreos y no arbóreos del sistema, ya sea en términos ecológicos y/o económicos (ICRAF, 1990 citado por Gob. 2006).

Los sistemas agroforestales son una forma de uso de la tierra en donde leñosas perennes interactúan biológicamente en un área con cultivos y/o animales; el propósito fundamental es diversificar y optimizar la producción respetando en principio de la sostenibilidad (López, 2007).

La Agroforestería se puede considerar como la combinación multidisciplinaria de diversas técnicas ecológicamente viables, que implican el manejo de árboles o arbustos, cultivos alimenticios y/o animales en forma simultánea o secuencial, garantizando a largo plazo una productividad aceptables y aplicando prácticas de manejo compatibles con las habituales de la población local (Musálem, 2001).

Se trata del uso de una serie de técnicas que combinan la agronomía, la silvicultura y la zootecnia para lograr un adecuado manejo del conjunto y las interdependencias entre cada uno de sus elementos (CONAFOR, 2007).

4.4. Disponibilidad de nutrientes en el suelo

La disponibilidad de nutrientes depende del pH del suelo y se mide a través de la actividad de del hidrogeno (H^+) en el suelo, lo cual a su vez define la acidez o alcalinidad de los suelos.

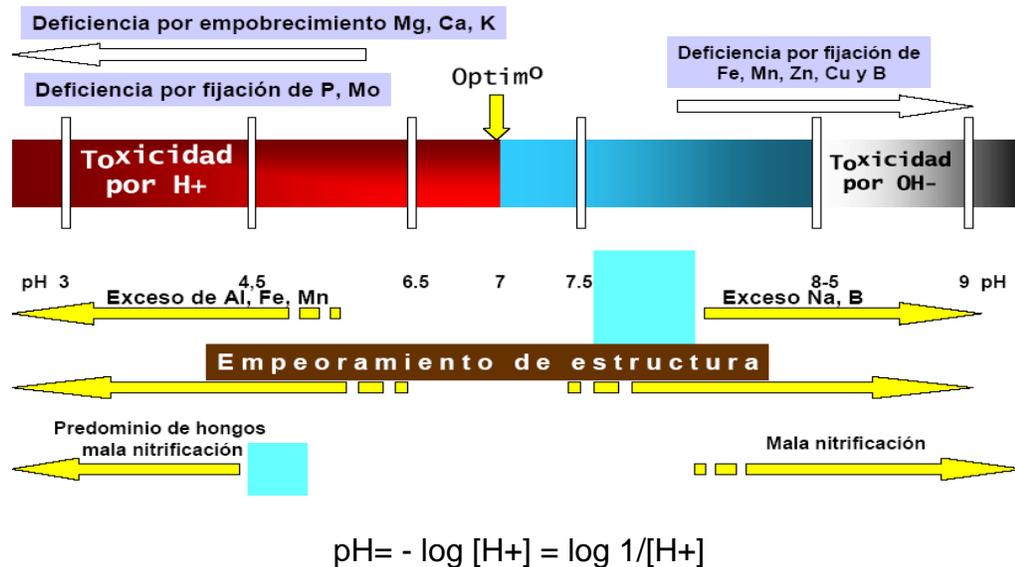


Figura 1. Efecto del pH en la disponibilidad nutrimental de los suelos.

Los suelos extremadamente ácidos tienen $pH < 4.5$, los suelos neutros tienen un pH de $6.6-7.4$ y los suelos altamente alcalinos tienen un $pH > 8.5$. Generalmente en suelos ácidos hay mayor número de iones de H^+ mientras que en suelos alcalinos hay un mayor número de iones de OH^- , por lo tanto se espera que en suelos neutros haya un equilibrio entre H^+ y OH^- (Sierra *et. al.*, 2001).

El pH ejerce un efecto sobre la disponibilidad de nutrientes como resultado de su impacto en la solubilidad de diferentes minerales. Muchos elementos cambian de forma, derivado de las reacciones químicas que ocurren en el suelo, y las plantas pueden o no absorber los elementos dependiendo de la forma en que se encuentren. La mayoría de los nutrientes están generalmente disponibles de manera adecuada a un valor neutro de pH 7(Figura 2).

Cada cultivo tiene diferentes intervalos de tolerancia a la acidez. Cuando el pH del suelo es menor al rango de tolerancia, es necesario incrementar el pH del suelo mediante el proceso denominado "enclado"(Sierra *et. al.*, 2001).

4.5. Nutrición mineral

La nutrición mineral de las plantas es un proceso extremadamente complejo, mediante el cual las plantas obtienen una parte de los elementos necesarios para vivir. En él, suceden una gran cantidad de interacciones de tipo físico, químico y biológico. Del suelo, la planta obtiene los elementos minerales esenciales para vivir.

Los demás elementos son obtenidos por la planta directamente de la atmósfera. Son los llamados nutrientes minerales, o simplemente nutrientes, que entran a la planta en general en forma de iones inorgánicos disueltos en el agua que absorben las raíces. Algunos de ellos se acumulan en la planta en cantidades considerables; son los macronutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio y azufre. Los restantes se encuentran en cantidades mucho menores;

son los micronutrientes: hierro, cobre, zinc, molibdeno, manganeso, boro y cloro (Landis, 1989).

Esta difundida clasificación de los nutrientes según su abundancia en la planta tiene, sin embargo, una validez relativa, ya que en no pocos casos algunos macronutrientes pueden encontrarse en menor cantidad que ciertos micronutrientes.

La adquisición de los elementos minerales por las raíces a partir de la solución del suelo, constituye el primer paso en la nutrición mineral de las plantas (Welch, 1995).

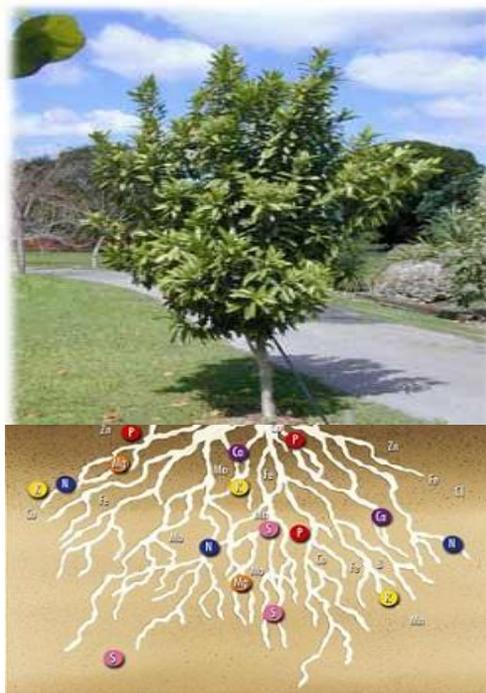


Figura 2. Absorción de nutrientes en las plantas

4.5.1. Factores que influyen en la absorción de nutrientes

El vástago, y sobre todo las hojas, son capaces de absorber diversas sustancias aportadas por el polvo o la lluvia, sobre todo en epifitas (plantas que

viven sobre las partes aéreas de otras plantas) pero también en plantas arraigadas en el suelo. Esta capacidad permite que las plantas absorban diversas sustancias que, aplicadas sobre la parte aérea del cultivo, actuarán como fertilizantes, herbicidas, etc. (Landis, 1989).

Con todo, la raíz, por su estructura y por su localización en el suelo, es el órgano vegetal especializado en la absorción de nutrientes y de hecho la mayor parte de la entrada de nutrientes tiene lugar a través de ella.

La absorción de nutrientes por la raíz dependerá de varios factores. Entre los cuales están:

Factores endógenos:

Crecimiento de la raíz: gracias a la cual la planta puede explorar nuevos volúmenes de suelo.

Además, las raíces de muchas plantas son capaces de formar micorrizas, asociaciones de tipo mutualista con diversas especies de hongos; la raíz cede las sustancias orgánicas que el hongo necesita, mientras que la presencia de éste favorece de forma notable la absorción de agua y de algunos nutrientes, especialmente fósforo (Clavijo, 2001).

Debido a que en la absorción de nutrientes están implicados los mecanismos de **transporte activo** (con gasto de energía metabólica) a través de las membranas de la célula de la raíz, también influye en este proceso la provisión del necesario sustrato respiratorio que, en forma de azúcares, en general la fotosíntesis y que por lo regular llega a la raíz desde el vástago (Loué, 1988).

Factores ambientales:

Factores edáficos: como son la temperatura, el pH o la aireación.

Ya sea porque modulan la disponibilidad del nutriente o porque influyen en el transporte activo a través de membranas en las células de la raíz (Kass, 1996).

4.6. Área de exploración radicular

La profundidad y el tipo de desarrollo de los sistemas de raíces de las plantas de importancia agrícola, forrajera o forestal, así como plantas no agrícolas, no se ajustan a una definición óptima ni a una zona o área del suelo para exploración específica. El área de exploración radicular depende de las siguientes variables básicas que son:

1. Características básicas del suelo y presencia o ausencia de limitantes asociadas. En los suelos profundos, sin limitantes por piedras, estratos endurecidos o nivel freático alto, con buena disponibilidad de agua y nutrimentos, bien drenados y aireados, las raíces de los cultivos agrícolas y especies frutales penetran profundamente en los estratos inferiores del suelo. Generalmente, estos suelos tienen texturas favorables: francas, franco-limosas, franco-arenosa fina o media, o franco-arcillo-limosas. Se denominan como suelos de texturas livianas. También tienen adecuado desarrollo estructural y gran cantidad de poros de tamaño mediano grueso, lo que favorece la aireación. Pero en suelos con condiciones diferentes en textura y estructura, como los denominados suelos moderadamente pesados (franco-arcillosos o franco-arcillo-arenosos), y pesados (arcillosos arcillo-limosos), con contenidos

de arcilla porcentual en un ámbito de 40 hasta 80 % y deficiente desarrollo estructural, el crecimiento de la raíz y el área de exploración radicular se restringe en alto grado, independientemente de la especie que se desarrolle en él, porque la subdivisión del sistema primario de la raíz en raíces secundarias, terciarias y de absorción (pelos radicales) disminuye, y se acortan en longitud.

2. Características genéticas ligadas a la especie de planta. Las raíces difieren mucho en su adaptabilidad al ambiente edáfico por variaciones intrínsecas de herencia genética, que hacen variar su morfología, arquitectura y tipo de raíz.

Dentro de los patrones de exploración radicular se presentan cuatro principalmente:

- Especies que desarrollan una raíz pivotante, leñosa y con ramificaciones laterales, generalmente en árboles y arbustos.
- Raíces que desarrollan un tipo de raíz fibrosa, especialmente las gramíneas, como pastos para forraje, caña de azúcar y arroz.
- Especies que desarrollan raíz tuberosa, como la zanahoria, la papa y el camote.

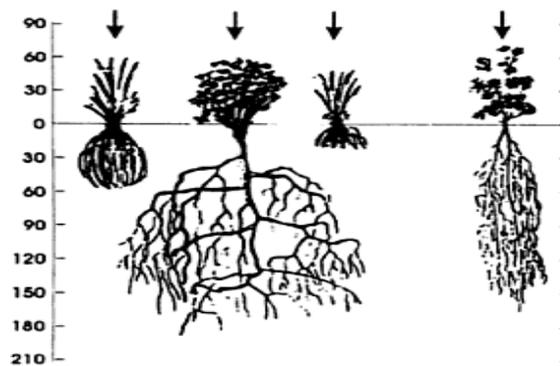


Figura 1. Variación del sistema radicular entre especies

- Especies que desarrollan un sistema radicular denso, fino y poco profundo, con pocas ramificaciones, tales como la cebolla y el apio. Este patrón es general para la mayoría de las hortalizas (Kass, 1996).

4.7. Cultivo de la Yuca (*Manihot sculenta crantz*)

La yuca o mandioca es una especie de origen americano, que se ha extendido en una amplia área de los trópicos americanos desde Venezuela y Colombia hasta el Noroeste de Brasil. Esta planta constituye uno de los alimentos fundamentales, especialmente en aquellas zonas con déficit alimentario, gracias a su importante contenido proteico y energético (Departamento de Ingeniería Agrónoma y Contenidos. 2007).

Esta es una de las especies más eficientes en cuanto a la producción de almidón, pues obtiene rendimientos de 60 t/ha/año bajo condiciones experimentales, siendo su potencial similar al de la caña de azúcar, maíz, sorgo y el arroz. Ahora bien, bajo condiciones subóptimas, su potencial de rendimiento sobresale cuando se le compara con otros cultivos; por eso se dice que esta especie tiene la habilidad de producir donde otros cultivos no crecerían.

Durante las primeras semanas la planta forma raíces fibrosas; dos o tres meses después de la siembra, algunas de las raíces fibrosas comienzan a acumular almidón, proceso que continúa hasta la cosecha final (Cock y Rosas, 1975).

4.7.1. Características de la planta de yuca.

Ficha técnica

Taxonomía y morfología

Familia. *Euphorbiaceae*

Género. *Manihot*

Especie. *Manihot esculenta*. Ésta es la especie cultivada, aunque según estudios taxonómicos, son sinónimos de *Manihot esculenta* como: *M. Utilisima*, *M. Aipi*, *M. Dulcis*, *M. Flexuosa*, *M. Flabellifolia*, *M. Difusa*, *M. Melanobasis*, *M. Digitiformis* y *M. Sprucei*.



Figura 2. Flor del cultivo de Yuca

Planta. La yuca es un arbusto perenne de tamaño variable, que puede alcanzar los 3 m de altura. Se pueden agrupar los cultivares en función de su altura en: bajos (hasta 1,50 m), intermedios (1,50-2,50 m) y altos (más de 2,5 m).

Tallo. El tallo puede tener posición erecta, decumbente y acostada. Según la variedad, el tallo podrá tener ninguna, dos, o tres o más ramificaciones primarias, siendo el de tres ramificaciones el mayoritario en la yuca. Las variedades con ramificación alta, es decir, mayores de 100 cm, facilitan las labores de escarda. El grosor del tallo se mide a 20 cm del suelo y puede ser delgado (menos de 2 cm de diámetro), intermedio (2-4 cm) y grueso (más de 4 cm). Al carácter del grosor del tallo se le ha asociado el alto rendimiento en raíces de reserva. Los entrenudos pueden ser cortos (hasta 8 cm), medios (8-20 cm) y largos (más de 20 cm).

Hojas. De forma palmipartida, con 5-7 lóbulos, que pueden tener forma aovada o linear. Son simples, alternas, con vida corta y una longitud de 15 cm aproximadamente. Los peciolo son largos y delgados, de 20-40 cm de longitud y de un color que varía entre el rojo y el verde. La epidermis superior es brillante con una cutícula definida. Según la defoliación en la estación seca, las variedades de yuca se pueden retener algo de follaje, o gran parte de follaje (60% aproximadamente).

Flores. Es una especie monoica por lo que la planta produce flores masculinas y femeninas. Las flores femeninas se ubican en la parte baja de la planta, y son menores en número que las masculinas, que se encuentran en la parte superior de la inflorescencia. Las flores masculinas son más pequeñas.

Sistema radicular. Comprende la corteza externa, la corteza media y la corteza interna y el cilindro central, estela, pulpa o región vascular. La corteza externa llamada también súber o corcho, corresponde un 0,5-2,0% del total de la raíz.

La industria del almidón prefiere aquellas variedades de adherencia débil. La corteza media está formada por felodermis sin esclerénquima. Posee un contenido en almidón bajo y en principios cianogénéticos alto. Constituye un 9-15% del total de la raíz. La corteza interna está constituida por parte del parénquima de la corteza primaria, floema primario y secundario. Por último, el cilindro central está formado básicamente por el xilema secundario. La raíz reservante no tiene médula y pueden ser raíces de pulpa amarilla, crema y blanca. El rendimiento de raíces por planta suele ser de 1-3 kg, pudiendo llegar en óptimas condiciones hasta 5-10 kg/planta 2006 (Departamento de Ingeniería Agrónoma y Contenidos, 2007).

4.7.2. Requerimientos ambientales

Temperatura: Los rendimientos máximos se obtienen en un rango de temperatura entre 25-29° C, siempre que haya humedad disponible suficiente en el periodo de crecimiento. Aunque puede tolerar el rango 16-38° C. Por debajo de los 16° C el crecimiento se detiene. Por este motivo en los climas tropicales-húmedos se alcanzan altas productividades, mientras que en otras regiones subtropicales, al descender de los 16° C se paraliza el crecimiento. Conforme la temperatura disminuye el desarrollo del área foliar se hace más lento, y el tamaño de las hojas más pequeño.

Luminosidad y fotoperiodo: La yuca crece y florece bien en condiciones de plena luz, siendo un factor importante de cara al rendimiento de la planta. La

longitud del día afecta a varios procesos fisiológicos de la planta. Es una planta típica de fotoperiodo corto: 10-12 horas de luz, propio de las regiones tropicales.

Suelo: La yuca es poco exigente en cuanto a suelo y se adapta condiciones de poca fertilidad hasta en aquellos con una alta fertilidad. Los suelos que prefiere deberán tener un pH ligeramente ácido, entre 6 y 7, con una cantidad adecuada de materia orgánica, deberán ser sueltos, porosos y friables, evitando suelos con excesos de agua o desérticos (Departamento de Ingeniería Agrónoma y Contenidos, 2007).

Precipitación. El cultivo de la yuca requiere precipitaciones que oscilan entre 500 y 3,500 mm, la óptima es de 2,000 mm para su buen desarrollo, aunque se caracteriza por la eficiencia de agua y la resistencia a periodos de sequía hasta por seis meses (INIFAP, 1999).

En el siguiente cuadro se muestran los distintos indicadores del cultivo de la yuca a nivel mundial, reportados para el año 2006 (Departamento de Ingeniería Agrónoma y Contenidos, 2007).

Cuadro 2. Principales regiones productores de Yuca

Continente	Producción-Cantidad (t)	Superficie cultivada (ha)	Rendimiento (kg/ha)
América	37.041.521	2.806.835	13.196,90
África	122.088.128	12.110.694	10.081,02
Asia	67.011.365	3.673.235	18.243,15
Oceanía	196.382	17.560	11.183,49
Total	226.337.396,00	18.608.324,00	52.726,27

Fuente: SIIM, 2001.

4.7.3. Requerimientos nutrimentales

Se ha estimado que la extracción de nutrientes del suelo para una producción de 25 t ha⁻¹ de raíz y de 5 a 6 t ha⁻¹ de parte aérea alrededor de 122 kg. de N, 27 kg. de P₂O₅; 145.7 kg. de K₂O; 54 kg. de Ca y 20 kg. de Mg De estos, aproximadamente 65 kg. de N, 15 kg. de P, 43 kg. de K, 54 kg. de Ca y 20 kg. de Mg corresponden a la parte aérea (tallos quebradizos, ramas tiernas y hojas) (INIFAP, 1999).

Cuadro 3. Niveles críticos de nutrimentos en el cultivo de yuca.

Parámetro	Nivel crítico
Ph	4.6 y 7.8
P (mgkg ⁻¹)	4
K (meq/100 g)	0.1
Ca (meq/100 g)	0.25
Zn (mgkg ⁻¹)	0.6

Fuente: Howeler, 1981

4.8. Cultivo de la Pimienta Gorda (*Pimienta dioica*)

La *Pimienta dioica*, que es una variedad nativa de Mesoamérica y ha sido cultivada ampliamente y naturalizada en varias partes del mundo. Se desarrolló en forma silvestre en las Antillas así como en varias partes del centro y sur de América: Cuba, Jamaica, sureste de México y se extiende desde Veracruz y Oaxaca a Chiapas, Guatemala, Belice, Honduras, Nicaragua y El Salvador (SAGARPA, 2001).

El rendimiento esperado de la pimienta varía con la edad de la planta y es influido por otros factores; para la pimienta, en el primer año de producción puede tener rendimientos de 2,6 t ha⁻¹, en el segundo año 5,2 t ha⁻¹, en el tercer año 10,3 t ha⁻¹, y el cuarto año 12,9 t ha⁻¹, después el rendimiento es sostenido y se estabiliza. El rendimiento en pimienta seca corresponde aproximadamente a una cuarta parte de la producción de pimienta verde (Gobierno del Estado de Veracruz, 2007).

En el municipio de Tuxtepec, Oaxaca, los productores de pimienta dioica logran rendimientos aproximados de 6 t ha⁻¹., debido a la edad y nivel de desarrollo de los árboles.

4.8.1. Características del cultivo de Pimienta

Nombre científico: *Pimenta dioica*

Sinonimia: *Pimenta officinalis*

Nombre(s) común(es): Pimienta de Jamaica, Pimienta de Tabasco, Pimienta gorda.



Figura 3. Flor del cultivo de Pimienta gorda

Status: Ninguno

Origen: Tiene su origen en el sur de México, Guatemala, Honduras, Cuba y Jamaica y se distribuye en esta región del sur de México y Centroamérica.

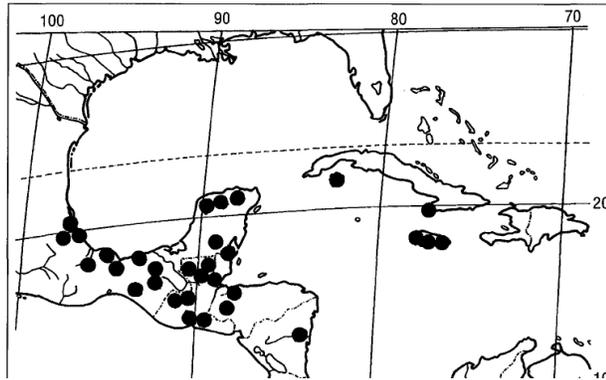


Figura 4. Mapa de distribución de *Pimenta dioica* en el Neotrópico. Basado en Landrum (1986).

Forma biológica: Árbol perennifolio de 7 a 10 m (excepcionalmente 30 m), con el tronco erecto, ligeramente acanalado, de copa baja, irregular y muy ramificada (las ramas ascendentes).

Fenología. Las flores de esta especie son estructuralmente hermafroditas pero funcionalmente dioicas. Los árboles estériles son funcionalmente masculinos y los que fructifican son funcionalmente femeninos. Florece de abril a mayo (Cal, 1999).

Hojas. De 5,5-17(22) x 2-6,5(8) cm, coriáceas, de color verde pálido y brillante por el haz y más pálido por el envés.

Inflorescencia en panícula. 5-12 cm, 3- 4 veces compuesta, con 50-100 flores.

Flores. De color blanquecino rosado, con clara tendencia a la separación de sexos, en general plantas dioicas.

Fruto. 0,4-1 cm de diámetro, subgloboso, densamente cubierto por glándulas rugosas al tacto.

Semillas c. 4 mm, suborbiculares, 1-2(3) por fruto (Macía, 1998).

Cuadro 4. Producción de pimienta verde en México 1999-2005 (Toneladas).

Estado	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Veracruz	9,058	4,034	4,204	4,492	4,602	5,048	2,750
Tabasco	396	703	1,929	1,443	2,650	2,970	2,820
Chiapas	239	138	509	360	261	209	522
Puebla	4	14	16	20	20	15	9
Oaxaca	15	4	12	12	12	16	15
Total	11,711	6,893	8,671	8,329	9,548	10,262	8,122

Fuente. Marcos, 2006

4.8.2. Requerimientos ambientales

Clima. La pimienta es un cultivo de la zona tropical húmeda y se adapta a altitudes inferiores a 1.000 msnm; los mejores resultados se obtienen en altitudes inferiores a 300 msnm.

Requiere un clima caliente y húmedo, con precipitaciones anuales entre 1.500 a 2.500 mm, bien distribuido durante el año, ya que no soporta períodos prolongados de sequía.

La temperatura anual media óptima varía entre 25 y 30 °C y la humedad entre 60-93%.

Suelos. Prefiere aquellos de origen aluvial, sueltos y con buen drenaje, ricos en materia orgánica, de manera que suelos arcillosos pesados para el manejo con maquinaria e impermeables no son recomendados. El pH apropiado es de 5.5 a 6.5, debido a que en ellos se encuentra la mayor disponibilidad de nutrientes.

Se aconseja suelos ligeramente inclinados que tengan drenaje natural, para evitar inundaciones frecuente. También se puede sembrar en terrenos planos pero bien drenados; en este último caso se debe sembrar en lomillos altos. En el caso de que se siembre en áreas con pendiente, los camellones se deben orientar según curvas de nivel, a fin de evitar la erosión del terreno. Para asegurar la sobrevivencia de los arbolitos en condiciones de temporal, se recomienda realizarla en el inicio de las lluvias (mayo-junio) (Gobierno del Estado de Veracruz, 2007).

4.8.3. Requerimientos nutrimentales

Se tiene escasa información con relación a los requerimientos nutrimentales de la pimienta. Se ha determinado que la planta es altamente demandante en calcio y potasio, por lo que los suelos ricos en carbonatos de calcio, pueden ser buenos (Ward, 1961).

Una dosis general de fertilización recomendada es de 20 g. de N, 18 g. de P_2O_5 y 50 g. de K_2O por árbol en el primer año posterior a la plantación, la cantidad de nutrientes se va incrementado año con año hasta llegar a un suministro de de 300:250:750 para árboles con un crecimiento de 15 años o más. Los fertilizantes son aplicados en dos épocas de manera equitativa, en el mes de mayo y septiembre, haciendo en el área de goteo una zanja superficial para enterrarlo. El Departamento de Agricultura de Jamaica, sugiere una dosis de 1 kg de mezcla de 10: 10: 10 o 15: 15: 15 NPK aplicada durante Febrero y septiembre en 0.4 kg/árbol/aplicación (Krishnamoorthy *et. al.*, 2004).

4.8.4. Producción y exportación

En el Cuadro 5 se presentan las principales potencias mundiales en cuanto a la producción de Pimienta, así como los principales países exportadores (Cuadro 6).

Cuadro 5. Principales países productores de Pimienta (Miles de Toneladas).

Países	2000	2001	2002	2003	2004
Vietnam	51	57.70	75	89.20	95.70
Indonesia	69.09	82.08	90.18	90.74	94.37
Brasil	38.69	50.14	56.94	66.46	64.54
India	59	64	51	51	51
China	17.66	18.66	20.68	21.68	22.18
Malasia	25.11	28.60	24	22	21
Sri Lanka	16.86	17.09	17.70	17.86	17.80
Tailandia	6.52	8.82	10.20	12.81	14
Ecuador	3.60	3.85	4	4.20	5.25
Filipinas	4.45	4.27	4.69	4.59	4.59

Fuente: <http://apps.fao.org/faostat>

Cuadro 6. Principales países exportadores de Pimienta (Miles de Toneladas).

Países	2000	2001	2002	2003	2004
Vietnam	36.40	57.00	78.40	73.90	98.49
Brasil	20.47	36.98	38.23	38.97	43
Indonesia	47.50	53.43	63.21	51.55	32.36
Malasia	23.68	25.54	22.84	18.35	19.79
India	19.13	19.64	21.07	15.32	15.43
Países Bajos	12.11	0.90	15.01	12.90	10.36
Alemania	3.63	3.83	4.76	7.80	8.74
México	4.53	4.66	4.34	3.86	5.79
Sri Lanka	4.86	2.16	7.92	7.74	4.85
Estados Unidos	4.37	3.56	3.34	4.28	4.37

Fuente: <http://apps.fao.org/faostat>

4.9. Descripción de la zona de estudio

4.9.1. Localización

La región del Papaloapan se localiza en el norte del Estado de Veracruz, en las coordenadas $96^{\circ} 08'$ longitud oeste y $18^{\circ} 05'$ latitud norte, a una altura de 20 msnm, ocupando una extensión de 933 km^2 . Limita al norte con el municipio de San Miguel Soyaltepec, al sur con los municipios de Santiago Jocotepec y Loma Bonita, al poniente con los municipios de Santa María Jacatepec, San Lucas Ojitlán y San José Chiltepec y al oriente con el municipio de Loma Bonita.

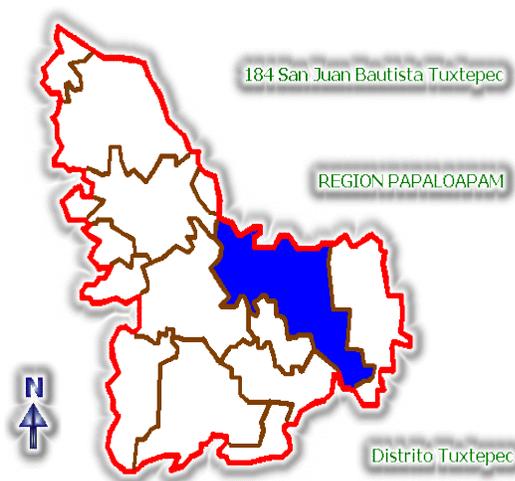


Figura 5. Mapa de Tuxtepec, Oaxaca.

4.9.2. Orografía

Región poca montañosa, cuenta algunas planicies. La topografía del municipio es plana

4.9.3. Hidrografía

Se localiza en la cuenca del Papaloapan. La cabecera del municipio está situada en la margen izquierda del Río Santo Domingo, antes de su confluencia con el Río Tonto, ambos formadores del Papaloapan.

4.9.4. Clima

Su clima es caluroso, con temperatura media de 25° C y la precipitación pluvial que se presenta es variable.

4.9.5. Principales Ecosistemas

La flora del municipio consta de especies como el ámate, higo, guapinol, aguacatillo, roble, cedro, lináloe, palma, ceiba, hormiguillo y pastizales.

La fauna del municipio consta de especies silvestres que existen son el puerco espín, armadillo, mapache, venado, temazate, venado cola blanca, zorra gris, aguililla y gavián.

4.9.6. Recursos Naturales

El municipio cuenta con bosques en donde extraen maderas corrientes y preciosas como la caoba, primavera y cedro.

4.9.7. Características y Uso del Suelo

El tipo de suelo localizado en este municipio es el Fluvisol éutrico, que es propicio para la vegetación de selva mediana (INFDM, 2009).

V. METODOLOGÍA

La metodología a emplear consta de los siguientes pasos:

5.1. Análisis de suelo

El análisis de suelo se define como cualquier medición química o física hecha en el suelo, mientras que en forma particular, se refiere a cualquier análisis químico rápido para evaluar el nivel de nutrientes disponibles para la planta, la salinidad, y los elementos tóxicos del suelo. Bajo el análisis de suelo, también se han incluido las interpretaciones, evaluaciones y recomendaciones de fertilizantes y enmiendas basadas en los resultados y en otras consideraciones (Summer, 2000).

5.2. Análisis foliar

El análisis foliar constituye una metodología sumamente eficiente para evaluar la nutrición del cultivo ya que integra todos los factores de suelo, ambiente y manejo, especialmente para los nutrientes menores. Debe ser considerada tanto para la corrección inmediata de deficiencias como también para evaluar los resultados del manejo de la nutrición (Alcántar *et. al.*, 1999).

Los métodos utilizados para el muestreo de suelo y foliar son los indicados en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Para explicar a detalle, la investigación se desarrolló en tres fases: (1) obtención de muestras de suelo y foliares del huerto en estudio, cuya superficie

es de una hectárea, (2) análisis químicos de las muestras colectadas y (3) análisis estadísticos e interpretativos de los resultados.

La finca cubre una superficie de 150 hectáreas, cultivada con árboles de pimienta dioica de 8 años de edad y de 7 a 8 m de altura, colocados a una distancia de 8x8 y en tres bolillo, lo cual origina una densidad de 144 árboles por hectárea. Parte de la plantación se encuentra cultivada de manera intercalada con yuca. De esta plantación se seleccionó una superficie de 100x100m, en la cual había 12 surcos y 12 calles. En las calles y a una distancia de 1 m de la hilera de árboles, se encontraba plantado el cultivo de yuca. En el área de estudio, se seleccionaron 25 árboles de acuerdo con características de uniformidad en tamaño de copa, altura, sanidad y vigor, de donde se colectaron muestras de suelo y follaje.

La muestra de suelo se obtuvo del área de goteo del árbol seleccionado, se extrajo una muestra por árbol con una barrena tubular cromada, a una profundidad de 0-30 cm, obteniéndose 50 gramos por submuestra, haciendo un total de 1250 gramos. El peso total del suelo fue mezclado homogéneamente, dividido en cuarterones y separados dos cuarterones opuestos, hasta obtener un peso de suelo de 350 gramos, cantidad que fue enviada al laboratorio para su análisis en sus componentes para evaluar la fertilidad. La muestra fue llevada al Laboratorio de Análisis de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, para ser procesada en cuanto a secado, molienda y tamizada. Posteriormente se le determinó pH, materia orgánica, N inorgánico, P, K, Ca,

Mg, Fe, Mn, Zn, Cu, B, CIC y Densidad aparente, mediante los métodos propuestos en la NOM-021-SEMARNAT-2000.

El análisis foliar de pimienta, se realizó colectando de 25 árboles, hojas lo más reciente y completamente desarrolladas. De cada árbol se obtuvo una hoja ubicada en cada uno de los cuatro puntos cardinales, soleadas, sanas, sin daños físicos ni químicos.

Las hojas se colocaron en bolsas de plástico y se introdujeron en una hielera portátil para su conservación y se trasladaron al laboratorio para su posterior preparación y análisis. La muestra obtenida se lavó de acuerdo al procedimiento propuesto por Chapman (1960), se secó a 70 °C durante 48 horas en estufa con circulación de aire forzado y se molió a malla 20 en un molino de acero inoxidable ($\text{HNO}_3/\text{HClO}_4=4/2$ ml). La concentración de P, K, Ca, Mg, Fe, Zn y Cu en el digerido fue determinada en un espectrofotómetro de inyección de plasma. El N se digesto en mezcla ácida (H_2SO_4) y se evaluó mediante destilación por arrastre de vapor (Bremer, 1965), adaptado para análisis de plantas y modificado con ácido salicílico para incluir nitratos.

Ya obtenidos los resultados, se estableció una relación entre la cantidad de nutrientes que hay en el suelo y la cantidad que hay en el follaje, las cuales a su vez se compararon con datos de rendimiento y demanda nutrimental del cultivo de pimienta y yuca. Esto se realizó con el fin de determinar si el suelo era capaz de proveer a los cultivos en cuestión con la cantidad de nutrientes que requieren para obtener producciones óptimas. En caso de no suministrar

las cantidades suficientes de nutrientes, se propondrá una dosis de fertilizantes que cubra las necesidades de nutrientes faltante.

VI: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante el análisis de suelo se determinaron las siguientes variables, las cuales se describen a continuación:

6.1. Diagnóstico nutrimental del suelo

En el Cuadro 7 se muestran los resultados de los análisis de fertilidad de suelos en donde se puede observar un pH ácido, nivel bajo de materia orgánica, nitrógeno inorgánico, fósforo, potasio, calcio, manganeso, zinc, cobre y boro.

Cuadro 7. Clasificación de la concentración de nutrientes en el suelo.

		ANÁLISIS DE SUELO									
Productor:	GONZALO TREJO				Fecha:	25/05/2009					
Municipio	RANCHO SAN LUÍS				Identificación:	3309-2					
Cultivo:	PIMIENTA		Rendimiento (ton/ha):		Muestra:						
Densidad planta					Edad						
CLASIFICACIÓN NUTRIMENTAL											
		DEFICIENTE	BAJO	MEDIO	ALTO	EXCESO					
Materia Orgánica	0.67 %										
Nitrógeno inorg.	4.12 mg/kg										
Fósforo	4.52 mg/kg										
Potasio	85.00 mg/kg										
Calcio	600.00 mg/kg										
Magnesio	149.00 mg/kg										
Hierro	40.80 mg/kg										
Manganeso	5.52 mg/kg										
Zinc	2.15 mg/kg										
Cobre	1.06 mg/kg										
Boro	0.10 mg/kg										
CIC	6.00 me/100g										
RELACIONES DE BASES INTERCAMBIABLES											
							BAJO	OPTIMO	ALTO		
pH	5.15										
Ca/Mg	2.45 me/100g										
Ca/K	13.76 me/100g										
Mg/K	5.627 me/100g										
Ca + Mg/K	19.391 me/100g										

Las condiciones en la zona de estudio, así como el pH ácido del suelo, han sido promovidas por la alta precipitación, la cual oscila entre 2000 a 4500 mm por año. El exceso de lluvia con el tiempo disminuye la disponibilidad de nutrientes (P, Mg, Ca y K) en los lugares donde suelen ser absorbidos por las plantas, debido a que han sido intercambiados por otros cationes como H^+ o Al^{3+} . Ello puede producir riesgo de toxicidad por aluminio (Al), manganeso (Mn) y otros metales que en condiciones ácidas pueden llegar a ser muy móviles. El aluminio puede producir descenso en el crecimiento en longitud de las plantas, ya sea inhibiendo el crecimiento celular y/o la división celular (Romero, 1995). Por su parte, el manganeso va a provocar daños en las partes aéreas de las plantas: manchas necróticas en los tallos y manchas rodeadas de un halo de necrosis en las hojas, que además van a aparecer arrugadas (Mortvedt *et. al.*, 1991).

Agotamiento de la capacidad de amortiguamiento del suelo. Se va produciendo una disminución progresiva de la capacidad de neutralizar ácidos a medida que el pH disminuye. Disminución del crecimiento de plantas y de los procesos microbiológicos que ocurren en el suelo, especialmente si el pH disminuye por debajo de 4. De esta forma se va a perder aporte de materia orgánica al haber menos biomasa y los procesos de nitrificación que realizan las bacterias van a estar desfavorecidos (Aitken *et. al.*, 1990). Esto conlleva una debilitación de la estructura de agregados del suelo que favorecía la aireación y el movimiento de agua, y se van a formar costras superficiales que aumentan la escorrentía y disminuyen la lixiviación (Fassbender y Bornemisza, 1995.).



Figura 6. Plantación de pimienta gorda.

Sin embargo, sobre los suelos de Tuxtepec se desarrollan una gran cantidad de cultivos entre los que destacan el arroz, caña de azúcar, maíz, cítricos, piña, entre otros. De manera que a pesar de las condiciones químicas se encuentra una concentración de nutrientes que hacen posible obtener ciertos rendimientos.

Con base en esta información se estimaron las concentraciones de nutrientes que es capaz de suministrar el suelo, lo cual se reporta en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Concentración y nutrientes disponibles en el suelo.

Nutriente	Concentración en el Suelo	Contenido en el Suelo (kg/ha)	Forma de acceso	Eficiencia (%)
Nitrógeno (mg kg ⁻¹)	4.12	14.83	F. M.	60
Fósforo (mg kg ⁻¹)	4.52	58.78	D	20
Potasio (mg kg ⁻¹)	85.00	368.77	D	60
Calcio (mg kg ⁻¹)	600.00	2,160	F.M.	100
Magnesio (mg kg ⁻¹)	149.00	536.4	F.M.	100
Hierro (mg kg ⁻¹)	40.80	146.88	I	5
Manganeso (mg kg ⁻¹)	5.52	19.87	D	60
Zinc (mg kg ⁻¹)	2.15	7.74	D	60
Cobre (mg kg ⁻¹)	1.06	3.82	I	5
Boro (mg kg ⁻¹)	0.10	0.36	FM	100

*D: Difusión, F.M.: Flujo de masas, I: Intercepción

Fuente: Elaboración propia mediante los resultados del análisis de suelos y datos presentados por Barber (1984).

Debe saberse que cada nutriente se mueve y se transporta de distinta manera del suelo hacia la planta. Las formas de acceso de los nutrientes son mediante: difusión, flujo de masas e intercepción.

Difusión: Cuando las raíces absorben nutrientes se crea un gradiente de concentración de nutrientes entre el suelo y la raíz. El resultado de este gradiente es un movimiento de nutrientes hacia las cercanías de las raíces por difusión. La cantidad de nutrientes transportadas por este mecanismo va estar a estar relacionado con el gradiente de concentración y con el coeficiente de difusión del nutriente (que varía con el tipo de suelo y la movilidad del nutriente en el suelo). En este proceso, los nutrientes se mueven como máximo 15 mm. Por tal motivo, el fósforo, potasio, magnesio y zinc deben agregarse de manera directa (Barber, 1984).

Los factores que influyen en la difusión son: Constante de solubilidad; Gradiente de concentración del nutriente entre dos puntos considerados; Humedad (la difusión se realiza en medio acuoso, por lo que se convierte en un factor crítico) y Temperatura (la difusión del nutriente es directamente proporcional a la temperatura).

Por ejemplo, entre el 0.1 y 0.3 ppm del fósforo en el suelo, se encuentra realmente en solución, plenamente disponible para microorganismos y plantas. Su mecanismo de movilidad es mediante difusión. Por tal motivo, la fuente de fósforo en un cultivo, debe ser aplicada al momento de la siembra y lo más cerca de las semillas (Alam *et. al.*, 2001).

Flujo de masas. Es el movimiento de agua y de los nutrientes que se encuentra disuelto en la masa líquida que llega hasta las raíces como resultado del proceso de transpiración de la planta. La cantidad de nutrientes que llega por este movimiento está relacionada con la concentración del mismo en la solución del suelo y con el volumen de agua que absorbe la planta. Este proceso de movimiento de nutrientes se da en distancias desde 1 m. a 1.5 m. (Barber, 1984).

Intercepción. A medida que la raíz crece, se ubica en estratos de suelo en los que encuentra los nutrientes disponibles para la planta. La cantidad de nutrientes que intercepta en forma directa la raíz se encuentra relacionada con la cantidad de nutrientes disponibles en el suelo ocupado por la raíz y el % de suelo explorado por la raíz. En general solo un pequeño % del total de nutrientes absorbido por la raíz llega por esta vía (Clarkson, 1981).

El % de nutrientes (respecto del total absorbido) que llega hasta la superficie de la raíz por este mecanismo varía de acuerdo al nutriente en cuestión (Cuadro 9) (Barber, 1984).

Cuadro 9. Distintos mecanismos de llegada de los nutrientes hasta la cercanía de las raíces en un cultivo de maíz con un rendimiento de 9,5 tn ha⁻¹. Valores en kg ha⁻¹ para cada nutriente.

Nutriente	Cantidad absorbida	Intercepción	Flujo de masas	Difusión
Nitrógeno	190	2	150	38
Fósforo	40	1	2	37
Potasio	195	4	35	156
Calcio	40	60	150	0
Magnesio	45	15	100	0
Azufre	22	1	65	0

Fuente: Barber, 1984

De esta manera, de la cantidad de nutrientes en el suelo depende el desarrollo tanto del cultivo de pimienta como el de yuca, y conociendo los requerimientos de ambos, se pudo establecer la deficiencia de nutrientes que existe en el suelo y la cantidad que es necesario aportar por medio de fertilización.



Figura 7. Pimienta dioica en el huerto en estudio.

Así, considerando en primera instancia a la yuca, se realizó el balance nutrimental de la cantidad de nutrientes demandados por el cultivo y los ofertados por el suelo. Este balance se efectuó tomando en cuenta datos de análisis foliar de la yuca y los obtenidos en laboratorio del suelo.

Para conocer el faltante de nutrientes necesarios para el desarrollo adecuado del cultivo se tomaron en cuenta datos de biomasa total (40 t/ha) menos el 70% de contenido de humedad, así como la densidad aparente del suelo (1.38 t/m^3), la concentración de cada nutriente en el tejido vegetal y la cantidad de estos en el suelo (kg/ha), todo esto considerado por hectárea.

De esta manera los resultados fueron los siguientes:

Cuadro 10. Manejo nutrimental de la yuca.

Nutriente	Concentración en el Suelo	Concentración en el Follaje	Concentración en el Follaje
	Kg/ha		Kg
Nitrógeno	14.83	2.73%	327.6
Fósforo	58.78	0.26%	31.2
Potasio	368.77	1.42%	170.4
Calcio	2,160	1.02%	122.4
Magnesio	536.4	0.26%	31.2
Hierro	146.88	17.4 mg/kg	208.8
Manganeso	19.87	7.2 mg/kg	86.4
Zinc	7.74	8.6 mg/kg	103.2
Cobre	3.82	1 mg/kg	12
Boro	0.36	0.06%	7.2

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de análisis de suelo y foliar

De la cantidad total de nutrientes presentes en el suelo, se presume que la capacidad de exploración y absorción radicular de la yuca es alrededor de 2/3. Por lo tanto, y tomando este dato como base, para el cultivo de yuca, la deficiencia nutrimental es la siguiente:

Cuadro 11. Deficiencia de nutrientes en yuca.

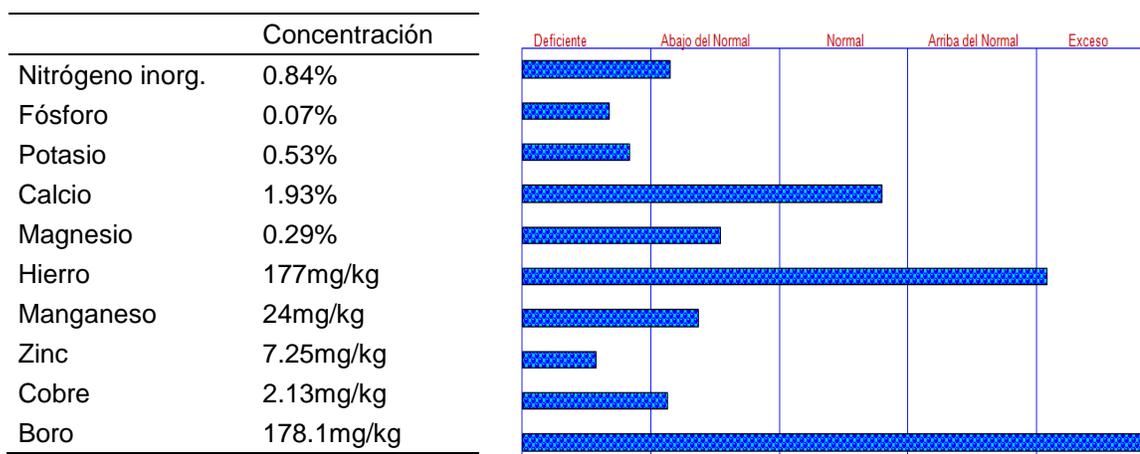
Nutriente	Concentración en el Suelo	Capacidad de Absorción	Concentración en el Follaje	Diferencia
	Kg/ha	Kg/ha	Kg	Kg
Nitrógeno	14.83	9.78	327.6	-317.82
Fósforo	58.78	38.79	31.2	7.59
Potasio	368.77	243.38	170.4	72.98
Calcio	2,160	1,425.6	122.4	1,303.2
Magnesio	536.4	354.02	31.2	322.82
Hierro	146.88	96.94	208.8	-111.86
Manganeso	19.87	13.11	86.4	-73.29
Zinc	7.74	5.10	103.2	-98.1
Cobre	3.82	2.52	12	-9.48
Boro	0.36	0.23	7.2	-6.97

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados de análisis de suelo y foliar

Nota. Las cifras en rojo muestran la cantidad de nutrientes en kilogramos que debe ser aportada por medio de fertilización.

El procedimiento anterior se repitió para el cultivo de pimienta gorda, tomando en cuenta un rendimiento de 6 t/ha., así como los datos obtenidos del análisis foliar (Cuadro 12).

Cuadro 12. Clasificación nutrimental del follaje de pimienta gorda.



De esta forma, los resultados finales se muestran en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Manejo y deficiencia nutrimental de la pimienta gorda.

Nutriente	Concentración en el Suelo (Kg/ha)	Concentración en el Follaje	Concentración en el Follaje Kg	Diferencia (Kg)
Nitrógeno	14.83	0.84%	15.12	-0.29
Fósforo	58.78	0.07%	1.26	57.52
Potasio	368.77	0.53%	9.54	359.23
Calcio	2,160	1.93%	34.74	2,125.26
Magnesio	536.4	0.29%	5.22	531.18
Hierro	146.88	177mg kg ⁻¹	318.6	-171.72
Manganeso	19.87	24mg/kg	43.2	-23.33
Zinc	7.74	7.25mg/kg	13.05	-5.31
Cobre	3.82	2.13mg/kg	3.83	-0.012
Boro	0.36	178.1mg/kg	130.86	-130.5

El análisis nutrimental de la pimienta gorda muestra que el tejido foliar presenta deficiencias en cuanto a fósforo, potasio y zinc, mientras que los nutrientes restantes se sitúan en el marco del régimen normal.

Realizando el balance de la cantidad faltante de nutrientes considerando la demanda tanto del cultivo de yuca como el de pimienta gorda, el déficit total a suplementar con fertilización es el siguiente (Cuadro 14):

Cuadro 14. Déficit nutrimental total (kg).

Nutriente	Concentración en el Suelo	Demanda de yuca	Demanda de pimienta	Total
	Kg/ha	Kg	Kg	Kg
Nitrógeno	14.83	327.6	15.12	-327.89
Fósforo	58.78	31.2	1.26	26.32
Potasio	368.77	170.4	9.54	188.83
Calcio	2,160	122.4	34.74	2,002.86
Magnesio	536.4	31.2	5.22	499.98
Hierro	146.88	208.8	318.6	-380.52
Manganeso	19.87	86.4	43.2	-109.73
Zinc	7.74	103.2	13.05	-108.51
Cobre	3.82	12	3.83	-12.01
Boro	0.36	7.2	130.86	-137.7

Considerando los resultados anteriores, es claramente visible el déficit de algunos nutrientes, los cuales juegan un papel sumamente importante en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos.

6.2. Funciones de los nutrientes

6.2.1. Función del N

El nitrógeno (N) es un elemento necesario para cualquier célula viva. Entra a formar parte de las proteínas y de las enzimas. Es necesario para la

síntesis y la transferencia de energía. El nitrógeno junto con el magnesio forma parte de la clorofila, por lo tanto, es el responsable de que las plantas tengan un color verde, de que crezcan las hojas y de que produzcan los frutos y semillas adecuados (Abadía, 1992).

6.2.2. Función del hierro (Fe).

Al igual que otros elementos, el hierro funciona como componente estructural y como cofactor enzimático. Forma parte estructural de los citocromos, citocromo oxidasa, catalasa. Peroxidasa y ferredoxina. Se encuentra tanto en sistemas respiratorios como fotosintetizadores. Aproximadamente, el 75 por 100 del hierro celular está asociado con los cloroplastos, determinando el importante papel que este elemento desempeña en la fotosíntesis. El hierro es esencial para la síntesis de clorofila. Cuando se suministra a plantas hierro en diferentes concentraciones, se observa una buena correlación entre contenido de hierro y contenido de clorofila. Trabajos realizados hace algunos años, primero con el alga *Euglena* y después en espinaca, parecen indicar que el hierro es necesario para la actividad de la enzima y aminolevulinato deshidratasa, se consideró que este paso podría controlar la síntesis de clorofila en sistemas deficientes en hierro (Alam *et. al.*, 2001).

6.2.3. Función del manganeso (Mn)

El manganeso es absorbido por la planta como Mn^{2+} , tanto por la raíz como por las hojas.

Aunque se desconocen muchas de las funciones del **Mn**, sí se sabe que interviene en numerosos procesos metabólicos:

- Dada su capacidad de cambiar de estado de oxidación, participa en numerosos sistemas enzimáticos de óxido-reducción como la superóxido dismutasa.
- Participa en la Fotosíntesis, formando parte de la mangano proteína responsable de la fotólisis del agua y producción de O_2 .
- Igualmente en deficiencia severa se observa una disminución en el contenido en clorofila.
- Interviene en la síntesis de proteínas, ya que participa en la asimilación del amonio.
- Puede sustituir al Mg como cofactor en sistemas enzimáticos relacionados con reacciones redox, descarboxilaciones, hidrólisis y la transferencia de energía.
- Influye en la formación de los azúcares (Azcón – Bieto, *et. al.*, 2000).

6.2.4. Función del zinc (Zn)

El zinc, cuya forma de asimilación es como ion Zn^{+2} , es esencial para promover ciertas reacciones metabólicas y activar algunos sistemas enzimáticos. Además este elemento cumple funciones en la síntesis de la clorofila y en la formación de hidratos de carbono. Es esencial en la producción

de materiales genéticos, al participar en la síntesis del ácido nucleico de las proteínas. Interviene en la formación de sustancia de crecimiento, como el ácido indolacético. Favorece la utilización del fósforo y del nitrógeno por las especies vegetales (Moreno, 2007).

6.2.5 Función del cobre (Cu)

La principal función del cobre en las plantas, es como activador del grupo de las oxidasas, que ayudan a metabolizar, entre otras sustancias el ácido ascórbico y los polifenoles, a través de la oxidación. Es un componente estructural de algunas proteínas (Navarro, *et. al.*, 2003).

6.2.6. Función del boro (B)

El Boro es uno de los micronutrientes esenciales para la producción vegetal. Actúa en las plantas en la división, diferenciación y elongación de las células de los tejidos meristemáticos. Aparentemente, el boro también regula el transporte de azúcar, metabolismo de los carbohidratos y proteínas en las plantas, las que necesitan un suministro continuo de este elemento en todos los puntos de crecimiento siendo un factor importante en la germinación del tubo polínico y por lo tanto, en el proceso de fertilización de flores, lo que garantiza un adecuado número de semillas en las vainas, lo que es importante para lograr un alto rendimiento de semillas y contenido de aceite del grano. El boro desempeña un importante papel en la regulación de la permeabilidad de la membrana, síntesis de la pared celular, respiración, hormona del metabolismo y regulación estomática (Navarro, *et. al.*, 2003).

Por todas las funciones de los micro y macronutrientes y el papel que desempeñan dentro de la planta, es necesario suplementar cada nutriente faltante por medio de fertilización, esto con el fin de garantizar buenos rendimientos de los cultivos.

6.3. Propuesta de fertilización

6.3.1 Nitrógeno

En este caso, se decidió realizar el aporte con Urea, ya que, como fertilizante, presenta la ventaja de proporcionar un alto contenido de nitrógeno, el cuál es esencial en el metabolismo de la planta, ya que se relaciona directamente con la cantidad de tallos y hojas, las cuáles absorben la luz para la fotosíntesis.

La Urea, en su forma original, no contiene Amonio (NH^{+4}), sin embargo ésta se hidroliza con rapidez por efecto de la enzima “ureasa” y por la temperatura del suelo. En suelos desnudos y con aplicaciones superficiales de Urea, algún porcentaje de Amoniaco (NH_3) se pierde por volatilización. La Urea, al hidrolizarse produce Amonio y bicarbonato. Los iones bicarbonato reaccionan con la acidez del suelo e incrementan el pH en la zona próxima al sitio de reacción de este fertilizante (banda de aplicación). Una vez que la urea se ha convertido en Amonio (NH^{+4}), éste es absorbido por las arcillas y la materia

orgánica del suelo y el Amonio es eventualmente nitrificado o absorbido directamente por las plantas.

Además, la Urea es la fuente más económica de Nitrógeno (N) de alta concentración. Es un fertilizante que tiene una gran variedad de usos y aplicaciones. Es un componente indispensable para producir fórmulas balanceadas de fertilización. Se puede aplicar al suelo directamente como monoproducto, se puede incorporar a mezclas físicas balanceadas, y por su alta solubilidad en agua, puede funcionar como aporte de nitrógeno en formulas NPK's foliares, para uso en fertirriego altamente solubles y en fertilizantes líquidos (Fertisquisa, 2007).

6.3.2. Hierro

Respecto a la aportación de hierro, esta se recomienda que sea mediante sulfato de hierro, ya que esta sustancia aporta al cultivo gran cantidad de nutrientes (azufre, hierro, manganeso) y ayuda a la reducción del pH, tanto de la materia orgánica como del suelo, lo cual permite mejorar la estructura de los suelos favoreciendo de ese modo la producción agrícola.

6.3.3. Manganeso

Para que el Manganeso pueda ser absorbido por las raíces de las plantas, estas deben encontrarlo como Mn^{+2} , y una manera de hacer asimilable en Mn es con Sulfato de manganeso, que es una sal que se utiliza en dos formas: $MnSO_4 \cdot 4H_2O$ (24%) y $MnSO_4 \cdot H_2O$ (32%), según la proporción de agua

de cristalización. Puede usarse como fertilizante foliar o sobre el suelo, pero se inmoviliza fácilmente en suelos deficientes que tienen un pH alto.

Dado que el suelo de la región tiene pH bajo y es fértil, este fertilizante es adecuado para mantener móvil al Mn.

6.3.4. Zinc

La movilidad del Zn dentro de la planta es muy pequeña, de forma que se encuentra concentrado en gran parte en la raíz, mientras que en los frutos su contenido es siempre bajo. Una manera de satisfacer la demanda de zinc, es mediante Sulfato de zinc, el cual contribuye en los procesos enzimáticos de las plantas, favorece a la formación y desarrollo de tejidos nuevos, es muy importante para el desarrollo, crecimiento y proceso productivo de las plantas.

6.3.5. Cobre

En el caso de deficiencia en cobre, una buena opción es el con Sulfato de cobre, ya que es un fertilizante de excelente solubilidad que permite su aplicación por vía edáfica, riego por riego por goteo, inyección directa a la raíz, riego por manguera o aspersion foliar.

En caso de que se requiera elevar el pH del suelo, se hace la siguiente recomendación de encalado, obtenida como dato extra mediante el análisis de suelos (Cuadro 15):

Cuadro 15. Índice de encalado.

CaCO ₃ (kg ha ⁻¹)	0.0	75	150	316	1207	2100
pH	5.0	5.2	5.4	5.6	5.8	6.0

VII. CONCLUSIONES

Debido a la naturaleza del tipo de suelo de la región (Fluvisol éútrico) y al pH que lo caracteriza (<7), todos los fertilizantes propuestos podrán causar el efecto esperado, permitiendo la disponibilidad de nutrientes para los dos cultivos y satisfaciendo las demandas de estos.

Debe saberse que el aspecto nutrimental es el elemento principal para que un cultivo pueda desarrollarse de forma adecuada, y desgraciadamente a este aspecto se le ha dado poca importancia y existen investigaciones mínimas en cuanto al tema.

La pimienta gorda es un cultivo con alto potencial productivo y comercial, pero hace falta investigación y difusión de sus beneficios para lograr que se propague en más regiones del país, ya que muchas de ellas tienen aptitud para su establecimiento.

El establecimiento de policultivos que no sean tan competitivos entre sí, y que sean de diferente especie, como en el caso de la pimienta gorda (arbórea) y la yuca (herbácea), favorecen el transporte y asimilación de nutrientes al poseer distinto sistema radicular.

De esta manera, la relación existente entre el cultivo de pimienta gorda y la yuca resulta ser positiva en cuanto a rendimiento y absorción de nutrimental.

Realizar análisis foliar y de suelo es el primer punto para conocer el balance de nutrientes presentes en el suelo y lo requerido por un cultivo, y de esta manera, manejar adecuadamente la relación nutrimental de este.

Para proponer el uso de algún tipo de fertilizantes, así como su dosis de aplicación, la cual vaya acorde al sistema agrícola, es importante conocer los síntomas de las deficiencias de nutrientes para no dar un diagnóstico apresurado y sin argumentos válidos y comprobables, los cuales puedan llevar a malas decisiones en cuanto al manejo, cuidados y fertilización de un cultivo.

Por tanto, el manejo nutrimental de un cultivo es la clave para obtener buenos resultados en cuanto a rendimientos, y nos da la pauta para determinar si un sistema de producción es sustentable nutrimentalmente o no.

VIII. LITERATURA CITADA

- Abadía, J. 1992. Leaf responses to Fe deficiency: a review. *J. of Plant Nutrition*. 15: 1699-1992.
- Aitken R. L., Moody P. W. & Mckinley P. G. 1990: Lime requiremem of Acidic Queensland Soils.I. Relations between Soil Propercies and pH Buffer Capacity». *AllSt.]. Soi! ReJearch*. 28: 695-701.
- Alam, S.; Kamei, S.; Kawai, S. 2001. Effect of iron deficiency on the chemical composition of the xylem sap of barley. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47 (3): 643-649.
- Alcántar G. G. y Sandoval V. M. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación Especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C. Chapingo, México.
- Azcón – Bieto, Joaquín y Talón, Manuel. (2000). Fundamentos de la Fisiología Vegetal. España: Ediciones Universitat de Barcelona. Editorial Mc Graw – Hill/ Interamericana de España, S. A. U.
- Barber, S.A. 1984. Soil Nutrient Bioavailability. Wiley, New York.
- Begon, M., Harper, J. L., Townsend, C. R. 1996. *Ecology: Individuals, populations and communities* Blackwell Science.
- Benton *et. al.* 1991. Plant Analysis Handbook: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretacion guide. Micro-Macro Publishing, Inc. USA
- Cal, W.A. 1999. Pimienta de Tabasco (*Pimenta dioica* L. Merrill) en sistemas agroforestales. *In:* Musalem, M.A. (ed) 1999. Curso Agroforestería. Universidad Autónoma Chapingo.
- Chapin, F. S., III. 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* II, 233 – 260.

- Clarkson, D.T. 1981. Nutrient interception and transport by roots system. In: "Physiological factors limiting plant productivity. C:B: Johnson (ed). Butterworths, London, PP 307-314.
- Clavijo, J. 2001. Metabolismo de los nutrientes en las plantas. In Fertilidad de Suelos: diagnóstico y control, 2° ed. por F. Silva, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia. p. 13-28.
- Cock, J. H. and Rosas, S. C. 1975. Efeito da deficiencia de agua na anatomia foliar de cultivares de mandioca (*Manihot esculenta Crantz*). Tesis (Maestría). Universidade Federal da Bahia ,Cruz das Almas (Bahia), Brasil 113 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR)-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. Tercera Edición. Zapopan, Jalisco, México.298 p.
- Comité Departamental de Cafeteros de Antioquia. S.f. Fertilice adecuadamente sus cafetales, haga análisis de suelos. Graficas Época, Medellín, 8 p.
- Departamento de Ingeniería Agrónoma y Contenidos. 2007. Cultivo de la Yuca. PRODUCTOS AGRI-NOVA Science (en línea). Disponible en: <http://www.infoagro.com/hortalizas/yuca.htm>
- Domínguez, V.A. (1997) Tratado de Fertilización. 3ra. Edición. Mundi Prensa. Madrid. 613 pag.
- Fassbender, H.; Bornemisza, E. 1995. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA, San José, Costa Rica. pp 40–113.
- Gliessman, S. 1986. Plant Interactions in Multiple Cropping Systems. In Multiple Cropping Systems, Ed. C Francis. NY: Macmillan.

- Gobierno del Estado de Chiapas. Secretaría de Desarrollo Rural. 2006. Prevención de incendios forestales y alternativas para recuperar la fertilidad de los suelos. Guía de extensionista forestal. 18 p.
- Gobierno del Estado de Veracruz. 2007. Monografía de la Pimienta. Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria.
- Grace, J. B. y Tilman, D. 1990. Perspectives on Plant Competition. Academyc Press Inc. San Diego, California
- Gutiérrez-Martínez, A., Aguilar Jiménez, C. E., Galdamez, J. 2007. Impacto Socioeconómico de los Sistemas de Policultivos maíz-frijol-calabaza en la Frailesca, Chiapas, México.
- ICA. 1992. Fertilización en diversos cultivos. Quinta aproximación. Produmedios, Santafé de Bogotá.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Oaxaca (INFDM). 2009. *Enciclopedia de los Municipios de México*. Estado de Oaxaca. San Juan Bautista Tuxtepec.
- Jaramillo, D. 1997. Variabilidad espacial de suelos, 167-188 pp. En: Osorio, W. Diagnostico Químico de la Fertilidad de Suelos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Medellín.
- Jones, J. B., Jr. Wolf, B. and A. H. Mills. 1991. Plant Analysis Handbook. A practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. Inc. Micro-Macro Publishing. USA.
- Kass, D. 1996. Fertilidad de Suelos. Editorial EUNED, San José, Costa Rica. 272 p.
- Krishnamoorthy, B. and Rema, J. 2004. Allspice (Pimienta de Jamaica). Indian Institute of Spices Research, India.

- Landis, T. D. 1989. Mineral nutrients and fertilization. In The container tree nursery manual, ed. por T.D. Landis, R.W.Tinus, S.E. McDonald y J.P. Barnett, Volume 4, Agricultural Handbook 674, Department of Agriculture, Washington. 67 p.
- Landrum, L. R. 1986. Pimienta Lindley. In: Flora Neotropica 45: 72 -115.
- Liebman, Matt. 1997. *Sistemas de policultivos*. Curso para Diplomado de Post-Grado. Consorcio Latinoamericano sobre Agroecología y desarrollo social (Clades). Centros de Estudio de Agricultura sostenible del Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias de La Habana (CEAS - ISCAH).
- López T. G. 2007. Sistemas agroforestales. SAGARPA. Subsecretaría de Desarrollo Rural. Colegio de Post-graduados. Puebla. 8 p.
- Loué, A. 1988. Los microelementos en agricultura. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 354.
- Macía, M. J. 1998. La pimienta de Jamaica [Pimenta dioica (L.) Merrill, Myrtaceae] en la Sierra Norte de Puebla (México). *Anales Jará. Bot. Madrid* 56(2): 337-349.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. 2° ed, Academic Press, New York. 674 p.
- Moreno Reséndez, Alejandro. 2007. Elementos nutritivos. Asimilación, funciones, toxicidad e indisponibilidad en los suelos. Ecología y Medioambiente.
- Mortvedt, J.J., Cox, F.R., Shuman, L.M., Welch, R.M. Micronutrients in Agriculture. 2ª Edición (1991). (Eds.) . Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA
- Musálem S. M. A. 2001. Sistemas agrosilvopastoriles. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. 120 p.

- Navarro Blaya, Simón y Navarro García, Guinés. 2003. Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal.
- Park, S.E. et al (2002). Comparing biological productivity in cropping systems: a competition approach. British Ecological Society; Journal of Applied Ecology 39: 416-426.
- Romero, L. 1995. Algunos Aspectos de la Nutrición Mineral de las Plantas. Editorial Granada. España.
- Ruiz Corral, J. A., Medina García, G., Ortiz Trejo, C., Martínez Parra, R., González Acuña, I. J., Flores López, H. E. y Byerly Murphy, K. F. 1999. *Requerimientos Agroecológicos de Cultivos*. INIFAP, México.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2001. *La pimienta, una especie milenaria en un mercado especial*. Revista Claridades Agropecuarias. No. 96. Agosto. México.
- Sierra, A., Simonne, Eric., Treadwell, D. 2001. Principios para el manejo de nutrientes en la producción de plantas. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.
- Stilling, P. 1999. Ecología : Teorías y Aplicaciones. Prentice hall.
- Sumner, Malcolm E. 2000. Diagnóstico de los requerimientos de fertilización de cultivos extensivos. *Presentado en el VIII Congreso Argentino de Siembra Directa, AAPRESID. Mar del Plata, 16-18 Agosto.*
- Tilman, D. 1982. Resources Competition and Community Structure. Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey.
- Tilman, D. 1988. Plant Strategies and the Structure and Dynamics of Plants Communities. Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey.
- Ward, J.F. 1961. *Pimento*. Kingston Govt. Printer.
- Welch, R.M. 1981. The biological significance of nickel. J. Plan Nutr. 3: 345-356

Willey, R. W. 1990. *Resource use in intercropping systems*. Agric. Water Manage. 17:215-231.