



## CONTENIDO

	Pág.
Manejo de la nutrición y fertilización de la palma aceitera .....	1
Micronutrientes en la fisiología de las plantas: Funciones, absorción y movilidad (Segunda Parte) .....	9
Eurípedes Malavolta, 1926 - 2008 In Memoriam .....	14
Reporte de Investigación Reciente .....	14
- Acumulación y susceptibilidad de las fosfatasas del fósforo orgánico en suelos fertilizados bajo pasturas	
- Predicción y análisis de la fertilización con potasio por sitio específico para maíz en suelos tropicales. Ejemplo de Tailandia	
Cursos y Simposios .....	15
Publicaciones Disponibles .....	16

Editor: Dr. José Espinosa

*Se permite copiar, citar o reimprimir los artículos de este boletín siempre y cuando no se altere el contenido y se citen la fuente y el autor.*



## MANEJO DE LA NUTRICION Y FERTILIZACION DE LA PALMA ACEITERA

C.R. Donough<sup>1</sup>

### Introducción

La palma aceitera es el cultivo que produce la cantidad más alta de aceite vegetal en el mundo (**Tabla 1**), con un rendimiento potencial que excede las 18 t ha<sup>-1</sup>. En plantaciones de Malasia, a escala comercial (2 000 ha), se han reportado rendimientos promedio anuales de aceite que exceden las 8 t ha<sup>-1</sup>, derivadas de un rendimiento de 38 t ha<sup>-1</sup> de racimos de fruta fresca (RFF) (IOI, 2006). Se han registrado rendimientos aún más altos en unidades de manejo más pequeñas y en lotes de investigación.

La palma aceitera tiene una alta demanda de nutrientes debido al rápido crecimiento anual, especialmente en los primeros años de su ciclo total de crecimiento (25 años), y a los altos rendimientos anuales obtenibles después que se inicia la producción en el tercero o cuarto año luego de la siembra en el campo (**Tabla 2, Figura 1**).

El nitrógeno (N) y potasio (K) son los nutrientes más requeridos, mientras que los requerimientos de magnesio (Mg) y fósforo (P) son menores (**Figura 1**). Estos nutrientes son removidos del campo en los RFF cosechados e inmovilizados en las palmas en el ciclo de crecimiento (25 años).

### Necesidad de fertilizantes

Cuando las plantaciones de palma aceitera empezaron en la costa del Norte de Sumatra y en Malasia, las palmas se cultivaron en suelos fértiles, pero al momento, más del 95% de las palmas en el Sureste Asiático se cultivan en áreas de suelos ácidos y con bajos niveles de fertilidad (Mutert, 2001). Por lo tanto, es necesario utilizar fertilizantes para satisfacer la demanda de nutrientes y soportar altos rendimientos.

Se ha demostrado consistentemente la respuesta a la aplicación de fertilizantes en numerosos experimentos en Malasia, donde se lograron altos rendimientos de RFF en un amplio rango de tipos de suelo (**Tabla 3**) (Kee y Goh, 2006).

<sup>1</sup> Consultor del International Plant Nutrition Institute, Southeast Asia Program, 126 Watten Estate Road, Singapore 287599. [chrisrd@pd.jaring.my](mailto:chrisrd@pd.jaring.my)

**Tabla 1. Rendimiento promedio de varias oleaginosas (Fairhurst y Mutert, 1999a; Kee y Goh, 2006).**

Cultivo	Rendimiento de aceite
	t ha <sup>-1</sup>
Palma aceitera	3.62 - 4.0
Coco	0.39 - 1.5
Colza	0.52 - 1.3
Maní	0.35 - 1.0
Girasol	0.55 - 0.7
Soya	0.33 - 0.5

**Tabla 2. Demanda anual de nutrientes para altos rendimientos de la palma aceitera (Adaptado de Kee y Goh, 2006).**

Demanda de nutrientes*			
N	P	K	Mg
kg ha <sup>-1</sup>			
114 - 193	12 - 27	149 - 279	22 - 61

\* Nutrientes removidos en los RFF e inmovilizados en las palmas.

### Economía del uso de los fertilizantes

En el año 2006, en Sabah, donde se cultiva el 30% de la palma aceitera de Malasia, los fertilizantes constituían alrededor del 29% del costo variable de la producción de RFF, segundo en costo después de la mano de obra (Tabla 4). Cuando las operaciones de campo son más mecanizadas y el costo de mano de obra es menor, los fertilizantes representan el 40-45% del costo total.

Con la rápida escalada de los precios de fertilizantes que se inició en el año 2007, la proporción del total de los costos variables atribuida a los fertilizantes es ahora más alta. La rentabilidad del uso de fertilizantes depende de la respuesta en rendimiento y del valor neto

**Tabla 3. Respuesta en racimos de fruta fresca (RFF) (t ha<sup>-1</sup>) encontrados en los experimentos de fertilización en Malasia (Adaptado de Tarmizi et al., 1992).**

Tipo de suelo <sup>a</sup>	Nº de exp.	Parcelas testigo <sup>b</sup>	Parcelas de máximo rendimiento <sup>c</sup>	Respuesta en rendimiento <sup>d</sup>
Inceptisoles	11	18.3 - 34.0	23.7 - 36.1	+ 1.1 - + 9.3
Ultisoles	10	8.6 - 28.1	25.5 - 36.8	+ 4.9 - + 23.8
Oxisoles	5	11.6 - 25.9	27.9 - 34.6	+ 2.0 - + 23.0

<sup>a</sup> Clasificación del USDA.

<sup>b</sup> Rango de rendimientos observados en las parcelas testigo sin fertilización.

<sup>c</sup> Rango de rendimientos observados en las parcelas de máximo rendimiento con fertilización.

<sup>d</sup> Rango observado de la respuesta en rendimiento.

**Tabla 4. Costos variables de la producción de RFF en Malasia en el 2006<sup>a</sup>.**

Insumos de costo variable <sup>b</sup>	Costo total
	%
Mano de obra	41.2
Fertilizantes <sup>c</sup>	28.8
Infraestructura y equipos <sup>d</sup>	10.4
Reparación y mantenimiento de equipos <sup>e</sup>	8.3
Transporte <sup>f</sup>	5.3
Gasolina	5.3
Herbicidas	0.7
Total	100.0

<sup>a</sup> Típica plantación de palma aceitera de 2 400 ha completamente madura en Sabah, Malasia.

<sup>b</sup> Costos Abril 2006 - Marzo 2007.

<sup>c</sup> Fertilizantes N, P, K, Mg y B.

<sup>d</sup> Reparación de caminos y puentes.

<sup>e</sup> Costo de maquinaria excluyendo la mano de obra y combustible.

<sup>f</sup> Transporte de los RFF a la extractora.

del producto, en relación al costo extra de los fertilizantes. Mutert (2001), usando datos de seis experimentos de fertilización a largo plazo conducido en la Estación de Investigación Bah Lias, Sumatra y los precios de los fertilizantes y los RFF en 1999, demostró que el uso óptimo de fertilizantes en Sumatra es altamente rentable, con retornos de 194-829% (Tabla 5).

Al momento, los precios de fertilizantes se han incrementado entre 150-250% en comparación con los precios de 1999. Basándose en los mismos datos de la Tabla 5, el costo de las dosis óptimas de fertilizantes es ahora 171-200% más alto, sin embargo, los precios de los RFF se han triplicado en el mismo tiempo y el uso de fertilizantes es ahora más rentable (Tabla 6), si no existe otros cambios en el costo de la estructura de la producción.

Sin embargo, los productores de palma aceitera no pueden dictar el precio de su cultivo y por esta razón, el estricto control de los costos de producción y mantenimiento de altos rendimientos continúa siendo la mejor estrategia para sostener a largo plazo la rentabilidad para la empresa.

Para lograr esto, los productores deben continuar con un juicioso manejo de nutrientes e implementar prácticas de fertilización diseñadas para el sitio donde se está produciendo, buscando maximizar la eficiencia de la utilización de dosis suficientes de nutrientes. Esto permite

sostener un crecimiento saludable de las palmas y el máximo rendimiento económico (mayor rentabilidad) a largo plazo.

### Objetivos y estrategias del manejo de nutrientes

Los objetivos del manejo de nutrientes en la producción de palma aceitera son:

- Asegurarse que las palmas sean abastecidas adecuadamente con una nutrición balanceada que soporte un sano crecimiento vegetativo y el máximo rendimiento económico.
- Lograr una alta eficiencia (máxima absorción y mínima pérdida) de los nutrientes aplicados para mantener la salud y fertilidad del suelo, evitar la contaminación ambiental por aplicación excesiva de nutrientes y no desperdiciar la inversión en fertilizantes costosos.

Para lograr estos objetivos, se debe seguir los siguientes pasos básicos:

- Estimar los requerimientos de nutrientes.
- Elegir las fuentes de nutrientes disponibles y apropiadas.
- Determinar las prácticas de campo más apropiadas para el manejo de nutrientes.

Estas estrategias deben ser de sitio específico y deben desarrollarse para la unidad de manejo más pequeña en la plantación, por ejemplo, un bloque de palma de la plantación que tiene su propio juego de condiciones en la palma y en el suelo.

### Estimación de los requerimientos nutricionales

El método más directo para estimar los requerimientos es el balance de nutrientes que estima la demanda y el suplemento de nutrientes para la palma. Los componentes de la demanda y suplemento de nutrientes se presentan en la **Tabla 7**.

En el agro-ecosistema de la palma aceitera, los nutrientes se remueven del campo en los RFF cosechados y se fijan o incorporan a las partes vegetativas de la palma (hojas, troncos y raíces). Los nutrientes pueden también perderse del sistema por escorrentía superficial, lixiviación y erosión.

Por otro lado, los nutrientes regresan al sistema cuando se reciclan en el campo las hojas podadas y las inflorescencias masculinas viejas, además de los racimos vacíos (RV) y los efluentes de la extractora (EE), si éstos son reciclados en la plantación. En el suplemento de nutrientes también se deben tener en cuenta el aporte del suelo y de la lluvia. También pueden contribuir las leguminosas de cobertura (LC). Se necesitarán nutrientes en forma de fertilizantes cuando existe un déficit de suplemento frente a la demanda.

Información completa de la demanda de nutrientes para el crecimiento y el rendimiento de la palma aceitera es todavía escasa y los trabajos clásicos del Dr. Ng Siew-Kee y sus colaboradores (Ng y Thamboo, 1967; Ng et al., 1968) siguen siendo una fuente valiosa de información.

La demanda de nutrientes es pequeña en los primeros años ya que las palmas jóvenes tardan en recuperarse del shock del

**Tabla 5. Rentabilidad del uso de fertilizantes en Sumatra en 1999 (Adaptado de Mutert, 2001).**

Exp.	Costo del fertilizante <sup>a</sup>	Rendimiento extra <sup>b</sup>	Ganancia <sup>c</sup>	Retorno
	US\$ ha <sup>-1</sup>	t ha <sup>-1</sup>	US\$ ha <sup>-1</sup>	%
1	257	+ 8.3	498	194
2	285	+ 11.0	660	232
3	111	+ 5.2	312	281
4	175	+ 17.6	1 056	603
5	118	+ 16.3	978	829
6	161	+ 8.3	498	309

- <sup>a</sup> Costo anual de los fertilizantes basado en el tratamiento óptimo de fertilización con precios de 1999.
- <sup>b</sup> Diferencias anuales de los rendimientos de RFF entre los tratamientos óptimos y los testigos sin fertilizantes.
- <sup>c</sup> Ganancias anuales basadas en los precios de 1999 de US\$ 0.06 kg<sup>-1</sup> RFF (US\$ 1= 8 500 Rupias de Indonesia).

**Tabla 6. Rentabilidad del uso de fertilizantes en Sumatra en el 2008 usando los mismos datos de la Tabla 5.**

Exp.	Costo del fertilizante <sup>a</sup>			Ganancia <sup>c</sup>	Retorno
	1999	2008	Dif. <sup>b</sup>		
	US\$ ha <sup>-1</sup>		%	US\$ ha <sup>-1</sup>	%
1	257	462	+ 180	1 494	323
2	285	498	+ 175	1 980	397
3	111	218	+ 196	936	430
4	175	349	+ 200	3 168	908
5	118	211	+ 179	2 934	1 392
6	161	274	+ 171	1 494	545

- <sup>a</sup> Costo anual de fertilizantes basado en tratamiento óptimo de fertilización.
- <sup>b</sup> Porcentaje de la diferencia en costo de los fertilizantes entre los años 2008 y 1999.
- <sup>c</sup> Ganancias anuales basadas en la estimación de los precios de RFF en el 2008 de US\$ 0.18 kg<sup>-1</sup> RFF (US\$ 1= 9 000 Rupias de Indonesia).

**Tabla 7. Componentes de la demanda y suplemento en el modelo de balance de nutrientes en palma aceitera (Adaptado de Ng, 1977).**

Componentes de la demanda	Componentes del suplemento
Nutrientes inmovilizados en las palmas	Nutrientes reciclados
Nutrientes removidos en los RFF	Contribución de lluvia
Nutrientes perdidos del sistema	Suplemento del suelo

**Tabla 8. Balance de nutrientes y fertilizantes necesarios para 30 t ha<sup>-1</sup> de rendimiento anual de RFF (Adaptado de Ng et al., 1999).**

Componentes del balance de nutrientes	Nutrientes			
	N	P	K	Mg
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----			
<b>Demanda</b>				
Almacenamiento en el tronco	42.4	4.1	121.6	10.2
Remoción en los RFF	99.1	15.6	129.6	33.3
Pérdidas por escorrentía, lixiviación, erosión	21.0	1.9	27.9	5.7
<b>Demanda total</b>	<b>162.5</b>	<b>21.6</b>	<b>279.2</b>	<b>49.1</b>
<b>Suplemento</b>				
RV retornado al campo	17.2	2.1	62.6	2.8
EE retornado al campo	6.6	1.4	31.3	5.8
Contribución de la lluvia	17.0	2.4	31.6	4.8
<b>Suplemento total</b>	<b>40.8</b>	<b>5.9</b>	<b>125.3</b>	<b>13.4</b>
<b>Diferencia</b>	<b>-121.7</b>	<b>-15.7</b>	<b>-154.0</b>	<b>-35.8</b>

transplante y en desarrollar su sistema radicular. Luego viene una etapa caracterizada por un rápido incremento de la absorción de K y N (Mg y P con menos intensidad) que dura pocos años hasta que la demanda se estabiliza (Figura 1).

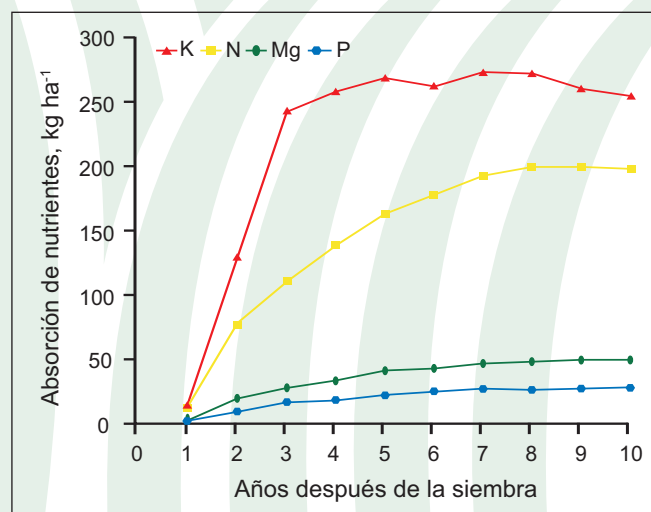
Los trabajos pioneros de Ng y sus colaboradores se realizaron con la vieja generación de los materiales Dura (D) sembrados antes de 1960 en suelos aluviales con rendimientos picos de alrededor de 25 t ha<sup>-1</sup> de RFF. Desde entonces se han realizado estudios con materiales Tenera (T) de nuevas generaciones con un potencial de rendimiento más alto en suelos aluviales y otros tipos de suelos (Teoh y Chew, 1987a; Chew et al., 1992; Tarmizi et al, 1992; Tarmizi y Tayeb, 2006). Estos reportes muestran que los nuevos materiales de siembra T tienen una productividad más alta y consecuentemente necesitan más nutrientes, especialmente N y K. Estos reportes han sido usados para estimar el requerimiento de nutrientes para reemplazar aquellos que se han removido del sistema con la cosechada y los que se han inmovilizado en los tejidos de la palma.

Un ejemplo del cálculo de balance de nutrientes adaptado de Ng et al. (1999) se presenta en la **Tabla 8**. En este cálculo, la meta de rendimiento es de 30 t ha<sup>-1</sup> de RFF. Se asume que las palmas están completamente maduras y estables, que el tamaño de la parte aérea de la palma permanece constante y que las necesidades de nutrientes para el crecimiento de la parte aérea son satisfechas totalmente con los nutrientes reciclados de las hojas podadas. Se asume además, que el sistema radicular está completamente desarrollado. En estas condiciones, queda como única demanda los nutrientes necesarios para el crecimiento del tronco. En este ejemplo de cálculo, el suelo es de la serie Munchong, típico suelo del interior de Malasia con poca fertilidad. No se toma en cuenta el contenido de nutrientes en el suelo, se reciclan los RV y los EE, pero el cake de la extractora no se regresa al campo.

Este método es simple y robusto y provee una base lógica y cuantitativa para una primera aproximación de los requerimientos de nutrientes.

Sin embargo, la información anterior debe complementarse con la información existente de otros experimentos de fertilización, análisis foliares e información de otros factores inherentes al sitio. Toda esta información es necesaria para estimar la

eficiencia de recuperación de nutrientes. Es importante contar con el conocimiento, habilidad y experiencia de un ingeniero agrónomo para interpretar correctamente los datos y diseñar la recomendación final de fertilizantes.



**Figura 1. Absorción de nutrientes (kg ha<sup>-1</sup>) en palma aceitera (Ng, 1977).**

**Información suplementaria para decidir las dosis finales de nutrientes**

**Análisis foliar**

Las concentraciones óptimas de los nutrientes pueden variar considerablemente en el tejido foliar dependiendo de varios factores como edad de la palma, número de la hoja, lluvia, propiedades del suelo, materiales de siembra, espacio y competencia entre palmas y la relación con otros nutrientes (Fairhurst y Mutert, 1999b).

Por esta razón, es aconsejable referirse a los “rangos” de concentración foliar de nutrientes asociados con un estado nutricional (deficiente, óptimo y excesivo), en lugar de un solo valor crítico (Tabla 9).

Los requerimientos nutricionales calculados anteriormente con el balance de nutrientes pueden ajustarse de acuerdo a los datos del análisis foliar.

Foster (2003) encontró una estrecha correlación entre los niveles óptimos de N, K y Mg y la cantidad total de cationes (K, Mg y Ca) en las hojas (CTCH). La CTCH se calcula de la siguiente manera:

$$CTCH \text{ (cmol kg}^{-1}\text{)} = [(K \text{ foliar}/39.1)+(Mg \text{ foliar}/12.14) + (Ca \text{ foliar}/20.04)] \times 1000$$

Se encontró que la mayor parte de la variación en los niveles óptimos de concentraciones foliares es causado por factores ambientales y la edad de la palma y que estos factores producían el mismo efecto en la CTCH, haciendo posible el uso de solo datos foliares de N, K y Mg para ajustar la recomendación.

Los niveles críticos foliares de N y P se relacionan con la siguiente ecuación (Tampubolon et al., 1990):

$$\text{Nivel crítico foliar de P} = 0.0487 \times (\text{N foliar}) + 0.039$$

Se pueden presentar fluctuaciones significativas en las concentraciones de nutrientes en las hojas dentro de un año causadas por la disponibilidad de la humedad en el suelo (Foster, 2003) (Tabla 10). Esta condición debe tomarse en consideración al momento de interpretar los datos ya que no es práctico, y generalmente no es posible, que el muestreo anual se conduzca exactamente al mismo tiempo, bajo el mismo clima y condiciones de campo.

Para reducir el error en la determinación de las dosis de fertilización, Foster (2003) recomienda tomar muestras foliares cada dos meses en bloques de monitoreo establecidos en cada plantación. Las muestras foliares de los otros bloques pueden tomarse en la época establecida de muestreo y los datos se pueden luego corregir por las fluctuaciones usando los datos del bloque de monitoreo.

Los datos del análisis foliar se pueden corroborar con observaciones de campo que determinen la presencia de síntomas de deficiencia. Witt et al. (2005) demostró que la calificación visual de los síntomas de deficiencias de Mg en el campo se correlacionan estrechamente con los niveles foliares de Mg, haciendo más confiable la respuesta a la fertilización con Mg. La calificación de los síntomas de deficiencia se realiza al momento del muestreo foliar (Fairhurst et al., 2005). La observación de síntomas es también muy útil para nutrientes cuyas deficiencias se presentan en las hojas jóvenes y no necesariamente en la hoja 17, por ejemplo el boro.

Si bien la concentración foliar de nutrientes es generalmente el parámetro aceptado, en el caso de K, la concentración en el raquis es un mejor indicador del contenido de K en la palma. Se ha demostrado que este parámetro tiene una muy estrecha correlación con el

**Tabla 9. Niveles de nutrientes en la hoja 17 asociados con un estado nutricional (deficiente, óptimo y excesivo) en palma aceitera (Adaptado de Fairhurst y Mutert, 1999b).**

Nutriente	----- Rangos de nutrientes en la hoja 17 -----		
	Deficiente	Optimo	Excesivo
-----% de materia seca -----			
Palmas < 6 años después de la siembra			
N	< 2.50	2.60 - 2.90	> 3.10
P	< 0.15	0.16 - 0.19	> 0.25
K	< 1.00	1.10 - 1.30	> 1.80
Mg	< 0.20	0.30 - 0.45	> 0.70
Palmas > 6 años después de la siembra			
N	< 2.30	2.40 - 2.80	> 3.00
P	< 0.14	0.15 - 0.18	> 0.25
K	< 0.75	0.90 - 1.20	1.60
Mg	< 0.20	0.25 - 0.40	0.70

**Tabla 10. Fluctuaciones anuales en los niveles foliares de nutrientes en hojas de palma aceitera en Sumatra (Foster, 2003).**

Nutriente	Feb.	Abr.	Jun.	Ago.	Oct.	Dic.	Prom.
----- % de materia seca -----							
N	2.52	2.40	2.48	2.56	2.60	2.52	2.52
P	0.159	0.157	0.160	0.157	0.166	0.165	0.161
K	0.86	0.89	0.86	0.90	0.94	0.90	0.89
Humedad del suelo (%)	< 10	0	50	40	> 90	> 90	

**Tabla 11. Clasificación del contenido de K en el raquis (Goh y Hardter, 2003).**

Estado	K en el raquis
	%
Alto	> 1.60
Adecuado	1.31 - 1.60
Marginal	1.01 - 1.31
Bajo	< 1.01

rendimiento (Teoh y Chew, 1987b) y también con K disponible en el suelo (Foster y Prabowo, 1996). La clasificación del contenido de K en el raquis propuesta por Teoh y Chew (1987b) y modificada por Goh y Hardter (2003) se presenta en la **Tabla 11**.

### Análisis de suelo

El análisis periódico del suelo es útil para monitorear la salud del suelo a largo plazo, para determinar si se está agotando o mejorando la fertilidad del suelo por efecto de las prácticas agrícolas implementadas y los nutrientes aplicados (Chew, 2007; Tinker, 2003). Algunos parámetros del análisis del suelo también tienen un impacto significativo en las respuestas en rendimiento a la aplicación de fertilizantes (**Tabla 12**). Sin embargo, en general, los datos del análisis del suelo no son tan útiles como los datos del análisis foliar como guía para determinar las necesidades de nutrientes en la palma aceitera por las razones que se describen a continuación (Goh, 1997):

- Falta de estandarización de los métodos de análisis de suelo y diferencias en la metodología de toma de muestras en el campo.
- Alta variabilidad inclusive en las mismas series del suelo.
- Falta de datos para evaluar las variaciones a través del año.
- Falta de datos del suelo en la mayoría de los experimentos con fertilizantes.

Sin embargo, los datos de mapeo de suelo son una parte esencial de la caracterización del sitio (Paramanathan, 2003) para determinar si el sitio es apropiado para el cultivo y para estimar el potencial de rendimiento.

### Datos de experimentos y observaciones de campo

Se han observado grandes diferencias en la respuesta en rendimiento a la aplicación de fertilizantes, inclusive en el mismo tipo de suelo (**Tabla 12**), como resultado de factores específicos del sitio como la edad de la palma, lluvia, topografía y características del suelo. Esto demuestra que se deben considerar varios factores para decidir las dosis de fertilizantes a aplicarse en un sitio en particular.

La eficiencia de absorción de nutrientes en palma aceitera reportada en Malasia fue algo menor, especialmente para K, que la reportada para otros cultivos (Chew et al., 1999) (**Tabla 13**). En Sumatra, Indonesia, se encontraron valores similares para N y K, así como también para P y Mg (Prabowo et al., 2002). Esta

**Tabla 12. Variación del rendimiento de RFF en respuesta a la aplicación de fertilizantes en cinco experimentos en las series de suelos Rengam en Malasia (Adaptado de Foster, 2003).**

	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5
Lotes de rendimiento óptimo					
Rendimiento de RFF (t ha <sup>-1</sup> )	28.7	29.1	27.1	29.1	28.8
Respuesta a N (t ha <sup>-1</sup> )	+ 4.9	+ 5.9	+ 0.5	+ 4.0	+ 2.5
Respuesta a K (t ha <sup>-1</sup> )	+ 8.9	+ 8.0	+ 0.7	+ 2.7	+ 5.2
Rendimiento limitado por	-	-	Pendiente	-	-
Mejor rendimiento debido a	-	Zona plana	-	Zona plana	-
Factores que limitan el rendimiento en parcelas testigo (mayor respuesta en rendimiento)					
Parcelas sin N	Edad de la palma	Más lluvia	-	-	-
Parcelas sin K	Baja MOS <sup>a</sup>	Baja MOS <sup>a</sup>	-	-	-
Factores que mejoran el rendimiento en parcelas testigo (menor respuesta en rendimiento)					
Parcelas sin N	-	-	Menos lluvia	-	Menos lluvia
Parcelas sin K	-	-	Alta MOS, K <sup>b</sup> alto en el suelo	Alta MOS, Bajo CIC <sup>c</sup>	-
<sup>a</sup> Materia orgánica del suelo. <sup>b</sup> K extraído con HCl caliente. <sup>c</sup> Capacidad de intercambio catiónico.					

**Tabla 13. Eficiencia de absorción del N y K en palma aceitera comparado con otros cultivos (Adaptado de Chew et al., 1999).**

Nutriente	Palma aceitera madura		----- Otros cultivos -----	
	Promedio	Rango	Promedio	Rango
----- % -----				
N	45	22 - 72	60	25 - 70
K	58	42 - 83	80 - 85	50 - 100

**Tabla 14. Efecto de N y K en el rendimiento y crecimiento de palma aceitera (Chan, 1982).**

	Niveles de N	----- Niveles de K -----		
		K0	K1	K2
----- kg palma <sup>-1</sup> -----				
Rendimiento de RFF	N0	72	65	66
	N1	68	95	96
	N2	79	96	99
Biomasa (materia seca)	N0	89	84	89
	N1	97	117	119
	N2	106	120	123

información indica que es necesario delinear medidas que mejoren la eficiencia de uso de los nutrientes en palma aceitera (Fairhurst, 1999).

Los experimentos de campo proveen de información útil sobre la pérdida de nutrientes del sistema. El entendimiento de los mecanismos de pérdida es esencial si se desea mejorar la eficiencia de uso de los fertilizantes. Los nutrientes pueden perderse o pasar a no ser disponibles por las siguientes razones:

- Escorrentía superficial (Maene et al., 1979; Kee y Chew, 1996).
- Lixiviación (Foong, 1993).
- Fijación (Tessens y Shamsuddin, 1983; Zaharah, 1979).
- Volatilización (Chan y Chew, 1984).
- Inmovilización en la cobertura (Han y Chew, 1981; Teo et al., 1990).

Las interacciones de nutrientes más importantes en palma aceitera son N:P, N:K y K:B (Goh y Hårdter, 2003). Las dos primeras son sinérgicas y las otras son antagonicas.

Los contenidos de los diferentes nutrientes deben estar en equilibrio debido a que una completa respuesta a un nutriente en particular sucede solamente cuando los contenidos de otros nutrientes no se encuentren a niveles limitantes. Por ejemplo, el N incrementa la producción de biomasa en ausencia de K, pero con

presencia de K la acumulación de materia seca es mucho mayor, como se observa en los datos presentados en la **Tabla 14**.

Se necesita de N y K para obtener altos rendimientos (**Tabla 14**); no existe respuesta de rendimiento a N o K aplicado en la ausencia de los otros nutrientes (Chan, 1982).

También se han reportado interacciones positivas entre el K y las prácticas culturales como la aplicación de mulch de RV, colocación de las hojas podadas en el campo y frecuencia de la aplicación del K (Chan et al., 1993), incrementando los rendimientos en 4-14%. Por otro lado, se ha demostrado que altas dosis de K inhiben la absorción de Mg y B y pueden reducir el rendimiento.

Los resultados de experimentos de campo, como los presentados anteriormente, y las observaciones realizadas durante las visitas del campo, provee de información que sirve de guía para tomar decisiones con respecto a dosis, fuentes de nutrientes, así como métodos y calendario de aplicación.

**Bibliografía**

Chan, K.S. and P.S. Chew. 1984. Volatilization losses of urea on various soils under oil palm. In: Proceedings of Seminar on Fertilizers in Malaysian Agriculture (Chew et al, eds.), Malaysian Society of Soil Science and Universiti Pertanian Malaysia, Kuala Lumpur, 91-103.

Chan, K.W. 1982. Potassium requirements of oil palm in Malaysia: Fifty years of experimental results. In: Phosphorus and Potassium in the Tropics (Pushparajah & Sharifuddin, eds.), Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur, 323-348.

Chan, K.W., K.C. Lim, and A. Ahmad. 1993. Fertilizer efficiency studies in oil palm. In: Proceedings of 1991 PORIM International Palm Oil Conference, Module I – Agriculture (Yusof et al, eds.), PORIM, Kuala Lumpur, 302-311.

Chew, P.S. 2007. Soil resources and plantation agriculture in Malaysia. In: Proceedings of Soils 2007: Peat and other Soil Factors in Crop Production (Hamdan et al, eds.), Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur, 1-41.

Chew, P.S., K.K. Kee, and K.J. Goh. 1999. Chapter 4: Cultural practices and their impact. In: Oil Palm and the Environment: A Malaysian Perspective (Gurmit et al, eds.), Malaysian Oil Palm Growers Council, Kuala Lumpur, 55-81.

Chew, P.S., K.K. Kee, K.J. Goh, Y.T. Quah, and S.H. Tey. 1992. Fertilizer management in oil palms. In: Fertilizer Usage in the Tropics (Aziz et al, eds.), Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur, 43-64.

Fairhurst, T. 1999. Nutrient use efficiency in oil palm: Measurement and management. The Planter, Kuala Lumpur 75(877):177-183.

- Fairhurst, T., J-P. Caliman, R. Härdter, and C. Witt. 2005. Oil Palm: Nutrient Disorders and Nutrient Management. PPI /PPIC-IPI, CIRAD and Pacific Rim Palm Oil Limited, 67pp.
- Fairhurst, T. and E. Mutert. 1999a. Introduction to oil palm production. *Better Crops International* 13(1):3-6.
- Fairhurst, T. and E. Mutert. 1999b. Interpretation and management of oil palm leaf analysis data. *Better Crops International* 13(1):48-51.
- Foong, S.F. 1993. Potential evapotranspiration, potential yield and leaching losses of oil palm. In: *Proceedings of 1991. PORIM International Palm Oil Conference, Module I – Agriculture* (Yusof et al, eds.), PORIM, Kuala Lumpur, 105-119.
- Foster, H. 2003. Assessment of oil palm fertilizer requirements. In: *Oil palm: Management for Large and Sustainable Yields* (Fairhurst & Härdter, eds.), PPI/PPIC-IPI, Singapore, 231-257.
- Foster, H. and N. Prabowo. 1996. Variation in the potassium fertilizer requirements of oil palm in North Sumatra. In: *International Palm Oil Congress: Competitiveness for the 21st Century - Agriculture* (Ariffin et al, eds.), PORIM, Kuala Lumpur, 143-152.
- Goh, K.J. 1997. Interpretations of analytical data from soil survey reports for manuring recommendations: Some pointers. *Royal Johore Planters' Association Annual Report 1997*, 25-30.
- Goh, K.J. and R. Härdter. 2003. General oil palm nutrition. In: *Oil palm: Management for Large and Sustainable Yields* (Fairhurst & Härdter, eds.), PPI/PPIC-IPI, Singapore, 191-230.
- Han, K.J. and P.S. Chew. 1981. Growth and nutrient contents of leguminous covers in oil palm plantations in West Malaysia. In: *Oil palm in Agriculture in the Eighties Volume II* (Pushparajah & Chew, eds.), Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, 235-252.
- IOI Corporation Berhad. 2006. Annual Report 2005, 30-31 (downloaded from [www.ioigroup.com](http://www.ioigroup.com)).
- Kee, K.K. and P.S. Chew. 1996. Nutrient losses through surface runoff and soil erosion: Implication for improved fertilizer efficiency. In: *International Palm Oil Congress: Competitiveness for the 21st Century - Agriculture* (Ariffin et al, eds.), PORIM, Kuala Lumpur, 153-167.
- Kee, K.K. and K.J. Goh. 2006. Efficient fertilizer management for higher productivity and sustainability in oil palm production. In: *Higher Productivity and Efficient Practices for Sustainable Plantation Agriculture (Vol.1)*, Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, 157-182.
- Maene, L., K.C. Tong, T.S. Ong, and A.M. Mokhtaruddin. 1979. Surface wash under mature oil palm. In: *Proceedings of Symposium on Water in Malaysian Agriculture* (Pushparajah, ed.), Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur, 209-216.
- Mutert, E. 2001. Nutrient management for oil palm. In: *Strategic Directions for the Sustainability of the Oil Palm Industry* (E Pushparajah, ed.), Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur.
- Ng, P.H.C., P.S. Chew, K.J. Goh, and K.K. Kee, 1999. Nutrient requirements and sustainability in mature oil palms - an assessment. *The Planter*, Kuala Lumpur 75(880):331-345.
- Ng, S.K. 1977. Review of oil palm nutrition and manuring - scope for greater economy in fertilizer usage. In: *International Developments in Oil Palm* (Earp & Newall, eds.), Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, Malaysia, 717-738.
- Ng, S.K. and S. Thamboo. 1967. Nutrient contents of oil palms in Malaysia. I. Nutrients required for reproduction: fruit bunch and male inflorescences. *Malay. Agric. J.* 46:3-45.
- Ng, S.K., S. Thamboo, and P. de Souza, 1968. Nutrient contents of oil palms in Malaysia. II. Nutrients in vegetative tissues. *Malay. Agric. J.* 46:332-391.
- Paramanathan, S. 2003. Land selection for oil palm. In: *Oil palm: Management for Large and Sustainable Yields* (Fairhurst & Härdter, eds.), PPI/PPIC-IPI, Singapore, 27-57.
- Prabowo, N.E., T. Lubis, T. Fairhurst, H. Foster, and E.N. Nafisah. 2002. Efficiency of fertilizer recovery by oil palm in Sumatra. In: *Proceedings of International Oil Palm Conference and Exhibition, Bali, Indonesia, IOPRI*, 9 p.
- Tampubolon, F.H., C. Daniel, and R. Ochs. 1990. Oil palm responses to nitrogen and phosphate fertilizer in Sumatra. *Oleagineux* 45:475-486.
- Tarmizi, A.M. and M.D. Tayeb. 2006. Nutrient demands of Tenera oil palm planted on inland soils of Malaysia. *Journal of Oil Palm Research* 18(1):204-209.
- Tarmizi, A.M., M.D. Tayeb, and Z.Z. Zin. 1992. Maximum yield of oil palm in Peninsular Malaysia: yield response and efficiency of nutrient recovery. In: *Yield Potential in Oil Palm* (Rao et al, eds.), International Society of Oil Palm Breeders and PORIM, Kuala Lumpur, 145-153.
- Teo, L., K.P. Ong, and R.J. MacLean. 1990. Responses of oil palm to eradication of *Ischaemum muticum*. In: *Proceedings of 1989 International Palm Oil Development Conference – Agriculture* (Jalani et al, eds.), PORIM, Kuala Lumpur, 301-307.
- Teoh, K.C. and P.S. Chew. 1987a. Potassium in the oil palm ecosystem and some implications to manuring practice. In: *Proceedings of 1987 International Oil Palm/Palm Oil Conference I - Agriculture* (H. Abdul Halim et al, eds.), PORIM and Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, 277-286.
- Teoh, K.C. and P.S. Chew. 1987b. Use of rachis analysis as an indicator of K nutrient status in oil palm. In: *Proceedings of 1987 International Oil Palm/Palm Oil Conference I - Agriculture* (H. Abdul Halim et al, eds.), PORIM and Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur, 262-271.
- Tessens, E. and J. Shamsuddin. 1983. Quantitative relationship between mineralogy and properties of tropical soils. *Universiti Pertanian Malaysia, Serdang*, 180 pp.
- Tinker, P.B. 2003. Chapter 11: Mineral nutrition of oil palms. In: *The Oil Palm* (4th ed.) (Corley & Tinker, eds.), Blackwell Science, United Kingdom, 327-389.
- Witt, C., T. Fairhurst, and W. Griffiths. 2005. The need to increase profitability in oil palm plantations: Matching crop and nutrient management principles with evolving strategies. In: *Proceedings of National Seminar 2005, Incorporated Society of Planters, Kuala Lumpur*, 123-144.
- Zaharah, A.R. 1979. Phosphate adsorption by some Malaysian soils. *Pertanika* 2:78-83.
- Zin, Z.Z., S.F. Foong, N. Jamaludin, C.T. Lee, A.B. Hamdan, A.M. Tarmizi, and H. Khalid. 2001. Evaluation of various sources of phosphate fertilizer for mature oil palm in Peninsular Malaysia. In: *Proceedings of 2001 PIPOC International Palm Oil Congress – Agriculture Conference, MPOB, Kuala Lumpur*, 272-281. ❖

# MICRONUTRIENTES EN LA FISILOGIA DE LAS PLANTAS: FUNCIONES, ABSORCION Y MOVILIDAD<sup>1</sup>

Ernest Kirkby<sup>2</sup> y Volker Römheld<sup>3</sup>

## (Segunda Parte)

### Cobre (Cu)

El Cu se parece en algo al Fe, debido que forma quelatos altamente estables que permiten la transferencia de electrones ( $\text{Cu}^{2+} + e^- \leftrightarrow \text{Cu}^+$ ). Por esta razón, desempeñan un papel comparable al del Fe en los procesos redox de la fisiología de la planta. Sin embargo, a diferencia de Fe, las enzimas que contienen Cu pueden reaccionar con oxígeno molecular y catalizan preferentemente procesos terminales de oxidación.

Varias proteínas que contienen Cu desempeñan un papel fundamental en procesos tales como la fotosíntesis, respiración, desintoxicación de radicales superóxido y lignificación. Cuando se presenta una deficiencia de Cu, la actividad de estas enzimas se reduce drásticamente. La reducción del transporte fotosintético de electrones, como consecuencia de menores contenidos de plastocianina, una proteína que contiene Cu, disminuye la tasa de fijación de  $\text{CO}_2$ , de modo que el contenido de almidón y de carbohidratos solubles (especialmente sacarosa) también se reduce. Este es el principal factor que provoca la reducción de la producción de materia seca en plantas que sufren de deficiencia de Cu durante el crecimiento vegetativo. La falta de abastecimiento de carbohidratos para los nódulos de las leguminosas, que causa crecimiento restringido y deficiencia de N en la planta hospedera, parece también ser un efecto indirecto de la deficiencia de Cu, puesto que no se ha encontrado evidencia específica de que el Cu sea requerido en el proceso de fijación de  $\text{N}_2$ .

Las enzimas superóxido dismutasa (SOD) han atraído recientemente una atención especial por el papel que desempeñan en la desintoxicación de radicales superóxido, los cuales pueden causar severos daños a las células por varios mecanismos (Cakmak,

2000). La Cu-Zn-SOD está localizada en los estromas de los cloroplastos, sitio donde el átomo de Cu está directamente involucrado en la desintoxicación de  $\text{O}_2^-$  generado durante la fotosíntesis. La actividad de las enzimas es mucho más baja cuando existe deficiencia de Cu.

El papel del Cu en el metabolismo secundario puede ser más bien el agente que provoca la presencia de síntomas de deficiencia. Las enzimas polifenol oxidasa, ascorbato oxidasa y diamino oxidasa que contienen Cu aparecen en las paredes celulares y desempeñan un papel importante en la biosíntesis del fenol, vía quinona, a sustancias melanóticas y a lignina (**Figura 4**).

La deficiencia de Cu disminuye la actividad de esas enzimas, provocando la acumulación de fenoles y la reducción de la lignificación (**Tabla 4**) y de sustancias melanóticas. El papel del Cu en el metabolismo secundario es importante para incrementar la resistencia de la planta a enfermedades. La formación de lignina interpone una barrera mecánica contra la entrada de organismos y la producción de sustancias melanóticas también aumenta la resistencia, puesto que algunos de estos compuestos, como las fitoalexinas, inhiben la germinación de esporas y el crecimiento de hongos.

**Tabla 4. Efecto del estado nutricional del cobre en la composición de la pared celular en hojas de trigo más jóvenes totalmente abiertas (Robson et al., 1981).**

Trat.	Concentración de Cu mg kg <sup>-1</sup> MS	Pared celular % MS	Composición de la pared celular		
			$\alpha$ -celulosa	Hemicelulosa	Lignina
			-----	% del total	-----
- Cu	1.0	42.9	55.3	41.4	3.3
+ Cu	7.1	46.2	46.8	46.7	6.5

MS = materia seca

1 Versión en español de: Kirkby, E.A. and V. Römheld. 2007. Micronutrients in plant physiology: functions, uptake and mobility. Proceedings 543, The International Fertilizer Society, P. O. Box, York, YO32 5YS, United Kingdom.

2 Professor, University of Leeds, United Kingdom. Correo electrónico: ekirkby@ukonline.co.uk

3 Professor, University of Hohenheim, Stuttgart, Germany. Correo electrónico: romheld@uni-hohenheim.de

Agradecimiento al International Fertilizer Society, en especial al Sr. Chris Dawson y a los autores Dr. E. Kirkby y Dr. V. Römheld, por el permiso concedido a IPNI para la traducción e impresión de esta publicación.

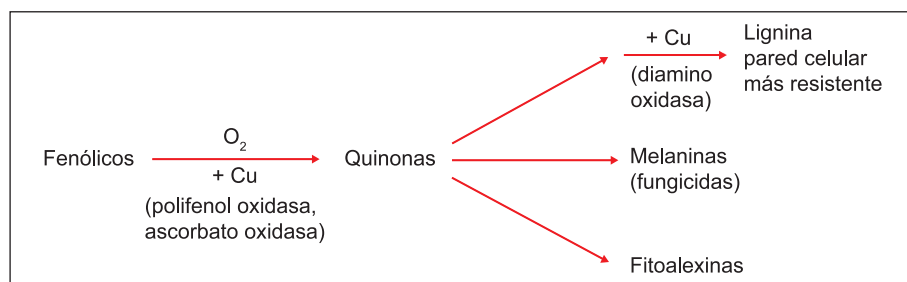


Figura 4. Ilustración de la función crítica de Cu en la transformación del fenol.

Los cereales deficientes en Cu tienen la apariencia de un arbusto, con la punta de las hojas enrolladas y blancas y con una reducida formación de panículas. Las espigas no se desarrollan totalmente y pueden quedarse parcialmente torcidas. Otros síntomas típicos son la reducción de la lignificación, que se asocia con brotaciones caídas y acame, principalmente en cereales,

El retraso en la floración y la senescencia, observados frecuentemente en plantas con deficiencia de Cu (Reuter et al., 1981), pueden ser causados por elevadas concentraciones del ácido indolacético (AIA) resultante de la acumulación de ciertas sustancias fenólicas, las cuales inhiben la acción del AIA oxidasa.

y baja resistencia a enfermedades. La deficiencia de Cu reduce drásticamente la producción de frutos y semillas como consecuencia de la esterilidad masculina inducida.

La falta de Cu afecta al crecimiento reproductivo (formación de granos, semillas y frutos) mucho más que al crecimiento vegetativo. En las flores de plantas con adecuado suplemento de Cu, las anteras (que contienen polen) y los ovarios tienen mayor contenido y demanda de este nutriente. De igual forma, el polen proveniente de plantas con deficiencia de Cu no es viable (Agarwala et al., 1980). Entre las causas de esterilidad masculina se incluyen la falta de almidón en el polen y la inhibición de la liberación de estambres como resultado de problemas en la lignificación de las paredes celulares de las anteras. Jewell et al. (1988) sugiere también que el desarrollo anormal tanto del tapete como de las microesporas pueden ser la causa de la esterilidad masculina. En trigo, el efecto más marcado de la deficiencia de Cu es la reducción del crecimiento del sistema reproductivo, condición que luego se expresa en la producción de granos (Tabla 5).

### Molibdeno (Mo)

El Mo difiere del Fe, Mn y Cu, en el hecho de que está presente en las plantas como anión, principalmente en la forma más oxidada, Mo(VI), pero también como Mo(V) y Mo(IV). Además, diferente a todas las otras deficiencias de micronutrientes, la deficiencia de Mo está asociada con las condiciones de pH bajo. También es importante anotar que de todos los micronutrientes el Mo está presente en las plantas en menor concentración (< 1 mg kg<sup>-1</sup> de MS), sin embargo, eso es suficiente para suplir adecuadamente la planta. Solamente algunas enzimas contienen Mo en las plantas superiores. Las dos más importantes y más investigadas son la nitrato reductasa y la nitrogenasa, presente en las leguminosas noduladas. Las enzimas que contienen Mo se pueden describir como proteínas multicentro de transferencia de electrones.

Los síntomas típicos de la deficiencia de Cu son clorosis, necrosis, distrofia foliar y muerte descendente. Los síntomas generalmente aparecen en los tejidos de los brotes, lo que es un indicativo de la pobre distribución de Cu en plantas con deficiencia de este nutriente (Loneragan, 1981).

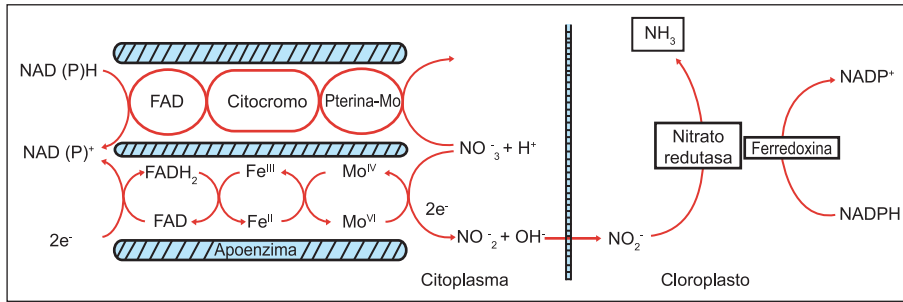
El nitrato reductasa, que promueve la reducción de NO<sub>3</sub> a NO<sub>2</sub>, está presente en el citoplasma. En una enzima dímera, con tres grupos prostéticos que transfieren electrones por subunidad, flavina, hemo y Mo (Figura 5). Durante la reducción, los electrones son transferidos directamente del Mo al nitrato. Existe una estrecha relación entre el suplemento de Mo, la actividad de la nitrato reductasa y el crecimiento. Por lo tanto, el suplemento de Mo está íntimamente relacionado con la utilización y el metabolismo del N.

Tabla 5. Efecto del suplemento de cobre en el crecimiento vegetativo y reproductivo de trigo en cultivo en arena (Nambiar, 1976).

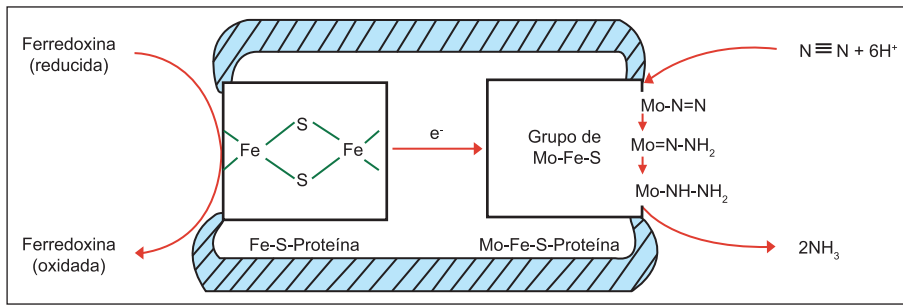
Suplemento de Cu	Crecimiento vegetativo de la planta	Crecimiento reproductivo de los granos
mg por vaso	----- g por vaso -----	
0.0	6.7	0.0
0.1	10.5	0.0
0.4	12.9	1.0
2.0	12.7	10.5

Como era de esperarse, las plantas nutridas de amonio (NH<sub>4</sub>) tienen requerimientos de Mo mucho más bajos que aquellas nutridas con NO<sub>3</sub>. Los síntomas de deficiencia de Mo son menos severos, e inclusive ausentes, en las plantas que reciben NH<sub>4</sub>, en comparación con plantas que reciben NO<sub>3</sub>.

La fijación biológica de N<sub>2</sub> es catalizada por la enzima nitrogenasa que contiene dos metaloproteínas: la proteína Mo-Fe-S y la proteína de la combinación Fe-S.



**Figura 5. Modelo estructural de la nitrato reductasa con sus dos subunidades. Cada subunidad contiene tres grupos prostéticos. FAD, heme-Fe y Mopterin (Campbell, 1988).**



**Figura 6. Modelo de la reducción de N<sub>2</sub> por el Mo contenido en la nitrogenasa.**

El Mo de la proteína de combinación Fe-S transfiere electrones directamente para el N<sub>2</sub>, mientras que el Fe actúa como transmisor de electrones. Esta función de Mo en la fijación de N<sub>2</sub> significa que la necesidad de este micronutriente en los nódulos de las leguminosas y de las no leguminosas (por ejemplo, *Alnus glutinosa*) es muy alta. La energía requerida para la fijación de N<sub>2</sub> se deriva del ATP que proviene de los fotosintatos entregados por la planta hospedera (Figura 6).

Las plantas con deficiencia de Mo muestran un aumento de compuestos solubles de N, como amidas, y la actividad de la ribonucleasa, en cuanto a las concentraciones de proteínas, se reduce indicando que el Mo está envuelto en la síntesis de estos compuestos. Este papel en la síntesis de proteínas puede ser el responsable del efecto directo del Mo sobre la concentración de la clorofila, la estructura de los cloroplastos y el crecimiento. Los síntomas de deficiencia de Mo difieren entre especies vegetales, pero los síntomas típicos son el punteado intervenal, la clorosis marginal de las hojas más viejas y enrollamiento hacia arriba de los márgenes de las hojas. A medida que la deficiencia progresa, aparecen manchas necróticas en las puntas y los márgenes de las hojas, las cuales se asocian con altas concentraciones de nitrato en el tejido. Quizá el ejemplo más conocido de esta deficiencia aparece en la coliflor, en la cual el tejido foliar no se forma adecuadamente y en casos extremos solamente se forman las nervaduras de las hojas. Por esta razón, la deficiencia de Mo en este cultivo se conoce como cola del látigo.

Algunos aspectos del papel del Mo en las plantas todavía no se entienden bien. En varios cultivos la deficiencia de Mo parece afectar más la fase reproductiva que el crecimiento vegetativo. En maíz con deficiencia de Mo la floración se retrasa, una buena cantidad de flores no se abre y se reduce la formación de polen, tanto en tamaño como en viabilidad (Agarwala et al., 1979). De igual manera, la pobre y tardía floración y la menor viabilidad del polen pueden también explicar la reducción de la formación de frutos de las plantas de melón con deficiencia de Mo cultivadas en suelos ácidos (Gubler et al., 1982 citados por Römheld y Marschner, 1991).

Existen varios cambios metabólicos que no son tan fáciles de explicar en términos de funciones conocidas del Mo. Por ejemplo, la resistencia a bajas temperaturas se reduce en plantas deficientes en este micronutriente (Vunkova-Radeva et al., 1988). Cuando se presenta deficiencia de Mo en los granos de maíz, el riesgo de brotación prematura aumenta y este efecto se acentúa con la aplicación de N (Tanner, 1978). Al parecer el Mo es un componente del aldehído oxidasa que participa en la síntesis de ácido abscísico (Leydecker et al., 1995). Cuando existe deficiencia de Mo, particularmente con alto suplemento de N, se bloquea la síntesis de este ácido.

### Zinc (Zn)

En contraste con el Fe, Mn, Cu y Mo, el Zn es un elemento de transición que no está sujeto a cambios de valencia y está presente en las plantas solamente con Zn(II). El elemento funciona principalmente como catión divalente en metaloenzimas, algunas de las cuales ligan las enzimas y sus correspondientes sustratos, mientras que en otros casos, el Zn forma complejos tetrahídricos con el N y el O, y particularmente ligados de S en una variedad de compuestos orgánicos.

Las plantas superiores tienen pocas enzimas que contienen Zn como la alcohol dehidrogenasa, anhidrasa carbónica (AC) y RNA polimerasa. Sin embargo, existen muchas enzimas que son activadas por el Zn. Aun cuando los cambios provocados por la deficiencia de Zn en el crecimiento y desarrollo de las plantas son bastante complejos, existen algunos cambios que son típicos y que se relacionan con las funciones de este

micronutriente en reacciones o en pasos específicos de las funciones metabólicas. Estos cambios inducidos en el metabolismo de la planta incluyen efectos sobre los carbohidratos, proteínas, auxinas y daños de la integridad de las membranas.

Muchas enzimas dependientes del Zn actúan en el metabolismo de los carbohidratos en especial en las hojas. Cuando ocurre la deficiencia de Zn, la actividad de AC disminuye acentuadamente. Esta enzima está localizada en el citoplasma de los cloroplastos y puede facilitar la transferencia de  $\text{CO}_2/\text{HCO}_3$  para la fijación fotosintética de  $\text{CO}_2$ . Como lo demuestra la muy baja tasa de fotosíntesis en el citosol de las células del mesófilo de las plantas  $\text{C}_4$ , y posiblemente también de las plantas  $\text{C}_3$ , AC es de gran importancia para garantizar una alta tasa de fotosíntesis. Dos otras enzimas también son afectadas por la deficiencia de Zn y también están presentes en los cloroplastos y en el citoplasma. Estas son la fructosa 1.6 difosfato, que regula los azúcares  $\text{C}_6$  en el cloroplasto y en el citoplasma, y la aldolasa, que promueve la transferencia de los fotosintatos  $\text{C}_3$  de los cloroplastos al citoplasma, y dentro del citoplasma controla el flujo de metabolitos vía procesos glicolíticos. En todos los casos, la actividad de estas enzimas se deprime como efecto de la deficiencia de Zn, pero a pesar de esta reducción la tasa de fotosíntesis no es afectada considerablemente y los almidones y azúcares frecuentemente se acumulan en plantas deficientes en Zn. En consecuencia, se puede

concluir que los cambios en el metabolismo de los carbohidratos inducidos por la deficiencia de Zn no son fundamentalmente responsables por el retraso en el crecimiento y tampoco por los síntomas visibles de la deficiencia de este micronutriente.

La alteración del metabolismo de la auxina, particularmente del ácido indolacético (AIA), está estrechamente relacionada con los síntomas de deficiencia de Zn como crecimiento retardado y “hojas pequeña”, es decir, inhibición en la elongación de los internodos y reducción del tamaño de la hoja. La forma cómo funciona el Zn en el metabolismo de las auxinas no está completamente clara; pero parece probable que el triptófano, el cual requiere de Zn para su formación, sea el precursor en la biosíntesis del AIA. De todas maneras, cuando se da la deficiencia de Zn, no solo que existe menos AIA sintetizado, sino que éste se ve sujeto a una mayor degradación oxidativa (Figura 7).

La deficiencia de Zn esta íntimamente relacionada con el metabolismo del N. Cuando se suprime el Zn, la concentración de proteínas disminuye y aumenta la de los aminoácidos. Al volver a proveer el Zn, rápidamente se induce la síntesis de proteínas. Este efecto de la deficiencia de Zn al inhibir la síntesis de proteínas, es principalmente el resultado de la disminución del ácido ribonucleico (ARN). Esto último es atribuido a la actividad más baja de la Zn polimerasa, a una menor integridad estructural de los ribosomas y a una mayor degradación del ARN. La fuerte disminución del crecimiento como consecuencia de la inhibición en la formación de proteínas (bajo una deficiencia de Zn) resulta a la vez en un consumo más bajo de carbohidratos lo que conduce a una disminución de la fotosíntesis y propicia una mayor producción de radicales de oxígeno, los cuales al no ser removidos promueven síntomas más fuertes de la deficiencia de Zn, particularmente bajo alta intensidad luminosa.

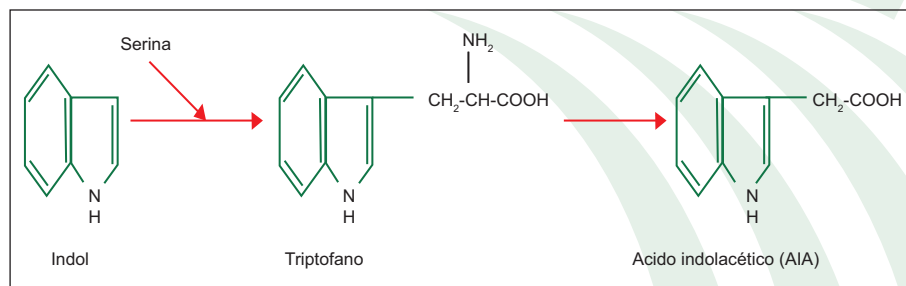


Figura 7. Esquema que muestra la probable dependencia de la síntesis del AIA en el abastecimiento de Zn.

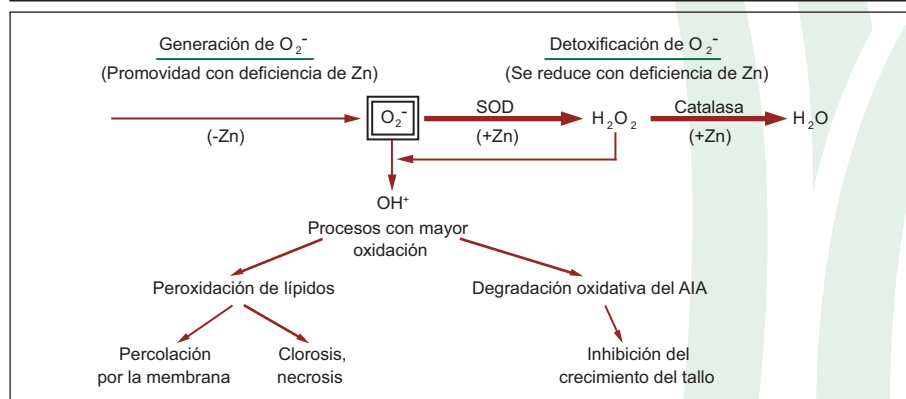


Figura 8. Intervención de Zn en la detoxificación de los radicales de superóxido y los efectos de los radicales libres de oxígeno en la función de la membrana y el metabolismo del AIA (Marschner, 1995).

remoción de radicales de O<sub>2</sub> por su rol en la enzima Cu-Zn-SOD. Al sufrir una deficiencia de Zn, la generación de O<sub>2</sub><sup>-</sup> aumenta y se produce un aumento típico de la permeabilidad de la membrana plasmática a medida que los radicales tóxicos de O<sub>2</sub> libres rompen los dobles enlaces de los ácidos grasos poli-insaturados y los fosfolípidos de las membranas. Esto lleva a una pérdida de azúcares, aminoácidos y potasio (K). El aumento de la oxidación de lípidos en las hojas lleva a la destrucción de la clorofila, necrosis y crecimiento atrofiado producto de la oxidación del AIA, particularmente bajo una alta intensidad luminosa (Marschner y Cakmak, 1989; Cakmak, 2000).

Existen cada vez más evidencias de que el Zn, al mantener la estructura e integridad de la membrana y el control de la permeabilidad; también protege la planta contra varios agentes patógenos. En plantas con deficiencia de este micronutriente, las membranas pierden sus características de permeabilidad de tal modo que los carbohidratos y los aminoácidos son liberados, atrayendo agentes patógenos e insectos tanto hacia las raíces y nuevos brotes.

Las concentraciones críticas típicas para deficiencia de Zn en los tejidos se encuentran entre 15 mg kg<sup>-1</sup> y 30 mg kg<sup>-1</sup> y pueden ser mayores en plantas con alto contenido de P. Los síntomas visuales más característicos en dicotiledóneas son los internodios cortos y la disminución de la expansión foliar (hojas pequeñas). En las monocotiledóneas se forman franjas cloróticas en ambos lados de la nervadura central; las cuales, posteriormente, se tornan necróticas.

La disminución del crecimiento y especialmente la necrosis de hojas viejas en las plantas deficientes de Zn se intensifica con alta intensidad luminosa. En los árboles, el lado más expuesto a la luz del sol se ve particularmente afectado, indicando la intervención de radicales superoxidados (Marschner y Cakmak, 1989; Cakmak, 2000). El Zn también es requerido para el crecimiento generativo y la viabilidad del polen es altamente dependiente de un adecuado suplemento de este nutriente (Sharma et al., 1990).

## Bibliografía

- Agarwala, S.C., P.N. Sharma, C. Chatterjee, and P.C. Sharma. 1980. Copper deficiency changes induced in wheat anther. Proceedings of the Indian National Science Academy, Calcutta 46(2):172-176.
- Agarwala, S.C., C. Chatterjee, P.N. Sharma, C.P. Sharma, and N. Nautiyal. 1979. Pollen development in maize plants subjected to molybdenum deficiency. Canadian Journal of Botany, Ottawa 57:1946-1950.
- Cakmak, I. 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. New Phytologist, Cambridge 146:185-205.
- Jewell, A.W., B.G. Murray, and B.J. Alloway. 1988. Light and electron microscope studies on pollen development in barley (*Hordeum vulgare* L.) grown under copper deficient and sufficient conditions. Plant Cell and Environment, London 22:273-281.
- Leydecker, M., T. Moureaux, Y. Kraepiel, K. Schnorr, and M. Caboche. 1995. Molybdenum cofactor mutants, specifically impaired in xanthine dehydrogenase activity and abscisic acid biosynthesis, simultaneously overexpress nitrate reductase. Plant Physiology, Rockville 107:1427-1431.
- Loneragan, J.F. 1981. Distribution and movement of copper in plants. In: Loneragan, J.F., A.D. Robson, R.D. Graham. Copper in Soils and Plants. London: Academic Press.
- Marschner, H. and I. Cakmak. 1989. High light intensity enhances chlorosis and necrosis in leaves of zinc, potassium and magnesium deficient bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. J. Plant Physiol. 134:308-315.
- Nambiar, E.K. 1976. Genetic differences in copper nutrition of cereals. 1. Differential responses of genotypes to copper. Australian Journal of Agricultural Research, Melbourne 27:453-463.
- Reuter, D.J., A.D. Robson, J.F. Loneragan, and D.J. Tranthim-Fryer. 1981. Copper nutrition of subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L. cv Seaton Park). 11 Effects of copper supply on the distribution of copper and the diagnosis of copper deficiency by plant analysis. Australian Journal of Agricultural Research, Melbourne 32:267-282.
- Robson, A.D., R.D. Hartley, and S.C. Jarvis. 1981. Effect of copper deficiency on phenolic and other constituents of wheat cell walls. New Phytologist, Cambridge, 89:361-373.
- Romheld, V. and H. Marschner. 1991. Functions of micronutrients in plants. In: Mortvedt, J.J., F.R. Cox, L.M. Shuman, R.M. Welch. (Ed.). Micronutrients in Agriculture. Madison: SSSA 2:297-328.
- Sharma, P.N., C. Chatterjee, S.C. Agarwala, and C.P. Sharma. 1990. Zinc deficiency and pollen fertility in maize (*Zea mays*). Plant and Soil. 124:221-225.
- Tanner, P.D. 1978. A relationship between premature sprouting on the cob and the Mo and nitrogen status of maize grain. Plant and Soil, Dordrecht 49:427-432.
- Vunkova-Radeva, R., J. Schiemann, R.R. Mendel, G. Salcheva, and D. Georgieva. 1988. Stress and activity of molybdenum-containing complex (molybdenum cofactor) in winter wheat seeds. Plant Physiology, Rockville 87:533-535.❖

## Eurípedes Malavolta, 1926 - 2008: In Memoriam

El Dr. Eurípedes Malavolta, uno de los científicos especialistas en nutrición de plantas más reconocidos de Brasil y del mundo, falleció el 19 de Febrero en Piracicaba, Brasil. El Profesor Malavolta se graduó de Ing. Agrónomo en la Universidad de Sao Paulo (USP), Escuela de Agronomía Luiz de Queroiz (EALQ), en 1948 y empezó su carrera como profesor en la misma Institución. En 1954 obtuvo su doctorado en Nutrición Mineral de Plantas en la Universidad de California, Berkeley, logrando luego varios otros títulos hasta convertirse en profesor a tiempo completo de la EALQ en 1958. Luego se desempeñó como director de la EALQ desde 1964 a 1970, período en el cual también trabajó como científico visitante en varias instituciones alrededor del mundo.

A lo largo de su carrera fue distinguido con varios honores, incluyendo el de Miembro de la Academia de Ciencias de Brasil en 1964 y el título al Mérito Nacional en Ciencias en 1998. También representó a Brasil en las Naciones Unidas como un consultor en ciencias y tecnología para el beneficio

de países menos desarrollados del mundo. En 1984 se retiró de la EALQ, pero continuó trabajando en el Centro de Energía Nuclear para la Agricultura de la USP como un investigador hasta tres días antes de su muerte.

Durante su distinguida vida profesional escribió 45 libros, los cuales fueron traducidos del Portugués a varios otros idiomas, incluyendo Español, Inglés, Hindú y Chino. Altamente reconocido por su enorme dedicación a la educación en todos los niveles, el Profesor Malavolta publicó 823 trabajos en diferentes revistas científicas y se desempeñó como consejero de 40 tesis de maestría y 64 disertaciones de doctorado.



Entre sus varias contribuciones técnicas, quizá la más reconocida mundialmente fue su trabajo en azufre, no solo en lo concerniente al efecto del azufre en el incremento del rendimiento de los cultivos, sino particularmente en la descripción de la importante relación de este nutriente con la calidad de las proteínas en los alimentos.

Es ampliamente reconocido su aporte a la nutrición de plantas y manejo de cultivos en América Latina a través de sus viajes por todos los países de la región ya sea para participar en simposios, seminarios o congresos, o como consultor de gremios de agricultores, universidades o instituciones de investigación. Además de su gran experiencia en nutrición de plantas y manejo de cultivos, el Profesor Malavolta se caracterizó por su sencillez y amabilidad y su perfecto dominio del idioma español. ❖



Foto de los instructores del seminario de nutrición y fertilización del café en Ecuador, 1991. El Profesor Malavolta es el primero de la izquierda.

## REPORTE DE INVESTIGACION RECIENTE

### ACUMULACION Y SUSCEPTIBILIDAD DE LAS FOSFATASAS DEL FOSFORO ORGANICO EN SUELOS FERTILIZADOS BAJO PASTURAS

Timothy, S.G., R.J. Simpson, P.A. Hadobas, D.J. Marshall, and A.E. Richardson. 2007. Accumulation and phosphatase-lability of organic phosphorus in fertilized pasture soils. Australian Journal of Agriculture Research. 58:47-55.

Se investigó la acumulación y actividad de las fosfatasas del P orgánico en tres suelos pastizales con fertilización contrastante por un período de ocho años. Los suelos fueron fertilizados con superfosfato desde 1994 o 1997, fertilización que continuó anualmente hasta el 2002. Los mismos suelos no recibieron P para el contraste en el estudio. La fertilización con P produjo un incremento de este elemento en las formas orgánicas e inorgánicas en el suelo, pero con diferencias en la distribución de varias

formas de P orgánico extraíble. La fertilización también afectó la cantidad de P orgánico susceptible a hidrólisis por fosfatasa no específica. La cantidad de P orgánico extraíble en agua, lábil a la fosfatasa, fue particularmente mayor en suelos que recibieron continuas aplicaciones de fertilizantes. A pesar de la mayor susceptibilidad a las fosfatasas de las diferentes formas de P orgánico en suelos fertilizados, el *Trifolium subterraneum* L., genéticamente modificado, que libera fitasa (fosfatasa) extracelular, no mostró respuesta consistente en crecimiento y nutrición de P al compararse con testigos silvestres o sin modificación genética que crecieron en los suelos que no se fertilizaron. Esto podría indicar que el P orgánico acumulado con la fertilización con P no es un sustrato efectivo para las plantas genéticamente modificadas que exudan fitasa, o que el P orgánico es igualmente disponible para las plantas genéticamente modificadas como para los controles. ❖

**PREDICCIÓN Y ANÁLISIS DE LA FERTILIZACIÓN CON POTASIO POR SITIO ESPECÍFICO PARA MAÍZ EN SUELOS TROPICALES. EJEMPLO DE TAILANDIA**

**Yost, R., and T. Attanandana. 2006. Predicting and testing site-specific potassium fertilization of maize in soils of the tropics-an example from Thailand. Soil Science 171(12):968-980.**

No ha sido fácil estimar de manera precisa los requerimientos de K en suelos tropicales. Los retos incluyen el manejo de suelos con baja capacidad de intercambio, la alta cantidad de lluvia con las consecuentes pérdidas por lixiviación de K, el poder estimar los requerimiento de K en presencia de minerales fijadores y el ajustarse a las necesidades de cultivos que remueven grandes cantidades de este nutriente. Además, existen ciertas condiciones en la fertilización con K que son similares a la de P, como la reactividad en el suelo. Sin embargo, la fertilización con K también tiene similitudes con la fertilización con N, debido a que los requerimientos son altos e influyen la cantidad de fertilizante necesaria. Se propuso y se evaluó un método para estimar las recomendaciones de fertilización con K por sitio específico en cinco provincias productoras de maíz (*Zea mays*, L.) en Tailandia. Se evaluó la precisión de las predicciones de

las recomendaciones de fertilización en el campo en el 2002 en la provincia de Nakhon Ratchasima. En el 2003, los experimentos de campo se llevaron a cabo en las provincias de Lop Buri y Nan. En 2004, las pruebas se llevaron a cabo en las provincias de Pitsanulok y Loei. Los resultados de los años 2002 y 2003 indicaron que la estimación del nivel inicial de los niveles críticos de K extraíble fue demasiado alta y no se obtuvo respuestas del cultivo al K al añadirlo en estos dos años. En el 2004, los experimentos realizados en suelos con menor K extraíble, demostraron una clara respuesta a la adición de fertilizantes potásicos. Las predicciones del método propuesto en el 2004 se compararon con las curvas de respuesta generadas con datos de campo y los resultados indicaron que el modelo generalmente predice de modo más preciso los requerimientos de K que el método anterior basado en la ecuación de Mitscherlich-Bray. Dos coeficientes claves del modelo, el nivel crítico de K del suelo y el coeficiente buffer de K, se compararon en los datos del 2002 y 2003. El nivel crítico obtenido en los experimentos de campo del 2004 se incrementó en medida que se incrementaron los rendimientos. Al comparar las predicciones del modelo con otros estudios de K publicados se encontró que la variación estaba dentro del rango esperado. El modelo de K se codificó para que pueda correr conjuntamente con el módulo de P en el programa de Apoyo a la Toma de Decisiones para Fósforo (Phosphorus Decision Support System).❖

**CURSOS Y SIMPOSIOS**

**1. XVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo**

**Organiza** : SCCS  
**Lugar y Fecha** : Villavicencio - Colombia  
 Octubre 28 - 31, 2008  
**Información** : SCCS  
 Tel.: 571 211 3383  
 eventos@sccsuelo.org  
 llanos@sccsuelo.org  
 www.sccsuelo.org

**2. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo**

**Organiza** : SECS  
**Lugar y Fecha** : Quito - Ecuador  
 Octubre 29-31, 2008  
**Información** : SECS  
 fcevents@farmacoclinica.com  
 calvache@uio.satnet.net  
 jespinos@ipni.net  
 www.secsuelo.org

**3. XVIII Reunión Internacional Acorbat - 2008**

**Organiza** : Acorbat  
**Lugar y Fecha** : Guayaquil - Ecuador  
 Noviembre 10-14, 2008  
**Información** : Acorbat  
 Tel.: 593 4 269 3565  
 ihidalgo@acorbato2008  
 www.acorbato2008.org

**4. II Simposio Internacional de Papaya**

**Organiza** : Universidad Tamil Nadu  
**Lugar y Fecha** : Tamil Nadu - India  
 Diciembre 9-12, 2008  
**Información** : Dr. N. Kumar  
 Tel.: 91 422 661 1310  
 kumarhort@yahoo.com  
 www.ishs-papaya2008.com

## PUBLICACIONES DISPONIBLES



Las siguientes publicaciones del IPNI se encuentran disponibles al siguiente costo en dólares

- \* **NUEVO: Nutrición y Fertilización del Mango.** Esta publicación ofrece información básica para el manejo de la nutrición y fertilización del mango tomando en cuenta las particulares características de desarrollo de este cultivo en el trópico. \$ 15.00
- \* **Manual de Arroz: Desórdenes Nutricionales y Manejo de Nutrientes.** Esta publicación contiene información que permite desarrollar estrategias de recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales. \$ 25.00
- \* **Guía Práctica para el Manejo de Nutrientes en Arroz.** Contiene una discusión concisa y muy práctica de las estrategias de manejo nutricional y recomendaciones de fertilización del arroz cultivado en regiones tropicales y subtropicales. Excelente herramienta de apoyo en el contacto diario con los agricultores. \$ 15.00
- \* **Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 1: Vivero.** Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 1 cubre el manejo del vivero para producir plántas de calidad que deben estar disponibles para la siembra en el campo en el momento requerido. \$ 20.00
- \* **Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 2: Fase Inmadura.** Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 2 cubre el manejo de la fase inmadura de la plantación para lograr una población uniforme de palmas productivas en cada bloque del campo. \$ 20.00
- \* **Guía de Campo, Serie en Palma Aceitera, Volumen 3: Fase Madura.** Guía de campo preparada específicamente para uso práctico en el manejo diario de la palma aceitera. El volumen 3 cubre el manejo de la fase madura de la plantación para lograr rendimientos sostenidos de racimos de fruta fresca a través de toda la etapa productiva del cultivo. \$ 20.00
- \* **Síntomas de Deficiencias de Nutrientes y Desórdenes en Palma Aceitera.** Guía de Bolsillo para técnicos a cargo del manejo de plantaciones que deseen identificar los síntomas de deficiencia en el campo, conocer algo de sus causas y como éstas podrían prevenirse o remediarse. \$ 8.00
- \* **Síntomas de Deficiencias Nutricionales y Otros Desórdenes Fisiológicos en Banano.** Guía de Campo para técnicos y agricultores que permite identificar en el campo los síntomas de deficiencias nutricionales, conocer sus causas y determinar una estrategia de prevención o recuperación. \$ 8.00
- \* **Manual Internacional de Fertilidad de Suelos.** Publicación didáctica sobre uso y manejo de suelos y fertilizantes con datos y ejemplos de diferentes partes del mundo \$ 15.00
- \* **Manual de Nutrición y Fertilización del Café.** Este manual presenta conceptos modernos del manejo de la nutrición y fertilización del café como herramienta para lograr rendimientos altos sostenidos. \$ 20.00
- \* **Manual de Nutrición y Fertilización de Pastos.** Esta publicación ofrece a las personas envueltas en la producción ganadera una visión amplia del potencial productivo, de los requerimientos nutricionales y de los factores limitantes impuestos por el ambiente tropical a la producción de forrajes. \$ 15.00
- \* **Nutrición de la Caña de Azúcar.** Este manual de campo es una guía completa para la identificación y corrección de los desórdenes y desbalances nutricionales de la caña de azúcar. El tratamiento completo de la materia y las excelentes ilustraciones hacen de este manual una importante herramienta de trabajo en la producción de caña. \$ 8.00