



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE EDAFOLOGIA**

## **NORMAS PRELIMINARES DE DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL COMPUESTO Y CORRELACIONES NUTRIMENTALES EN PIMIENTO (*Capsicum annuum*)**

LEOPOLDO ARROYO VARGAS

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

2011

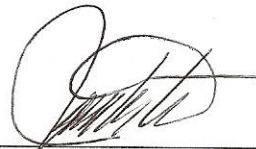
La presente tesis titulada **Normas Preliminares de Diagnóstico Nutricional Compuesto y Correlaciones Nutrimientales en Pimiento**, realizada por el alumno **Leopoldo Arroyo Vargas**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**EDAFOLOGÍA**

CONSEJO PARTICULAR

**CONSEJERO:**



---

**DR. JUAN LUIS TIRADO TORRES**

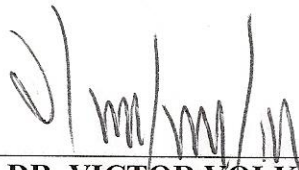
**DIRECTOR:**



---

**DR. RICARDO DAVID VALDEZ CEPEDA**

**ASESOR:**



---

**DR. VICTOR VOLKE HALLER**

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Abril de 2011

# NORMAS PRELIMINARES DE DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL COMPUESTO Y CORRELACIONES NUTRIMENTALES EM PIMIENTO (*Capsicum annuum*)

Leopoldo Arroyo Vargas, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2011

## Resumen

El chile es uno de los principales cultivos hortícolas en México. Su importancia radica en los jornales que demanda y que es producto de exportación. Del año 2000 a 2009, la producción de chile pimiento fresco se incrementó de 1734 a 2055 miles de toneladas, pero se han presentado problemas fitosanitarios. Es sabido que plantas sanas resisten mejor el ataque de plagas y enfermedades. La sanidad, entonces, se basa en una nutrición balanceada. En este contexto un buen diagnóstico nutrimental es primordial. Este estudio fue desarrollado para determinar las normas preliminares de diagnóstico de nutrimento compuesto (DNC) e identificar correlaciones importantes entre nutrimentos y rendimiento en chile pimiento. Para ello, un experimento se estableció en condiciones de invernadero al considerar la solución nutritiva de Steiner en tres concentraciones. Cada unidad experimental constó de 12 plantas distribuidas en cuatro bloques completos aleatorizados. El rendimiento de fruto fresco fue registrado al realizar tres cortes. En tejido vegetal (hojas maduras) se determinaron las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn. Las normas preliminares con la técnica DNC se determinaron al considerar esa base de datos. A través del análisis de los coeficientes de Pearson se identificaron correlaciones significativas. Las normas preliminares de DNC propuestas y expresadas como logaritmos de las proporciones centradas (media  $\pm$  desviación estándar) para  $d = 8$  nutrimentos con base en una subpoblación ( $n = 19$ ) de alto rendimiento ( $> 1333.33$  g planta<sup>-1</sup> de chile pimiento fresco en invernadero) son:  $V_N^* = 2.51 \pm 0.17$ ,  $V_P^* = 0.09 \pm 0.14$ ,  $V_K^* = 2.57 \pm 0.25$ ,  $V_{Ca}^* = 1.66 \pm 0.16$ ,  $V_{Mg}^* = 0.56 \pm 0.13$ ,  $V_{Fe}^* = -3.76 \pm 0.11$ ,  $V_{Cu}^* = -5.96 \pm 0.25$ ,  $V_{Mn}^* = -3.13 \pm 0.14$  y  $V_{R_s}^* = 5.46 \pm 0.12$ . Estas normas corresponden a los siguientes rangos de concentraciones óptimas (media  $\pm$  desviación estándar en g Kg<sup>-1</sup>) en tejido vegetal de chile pimiento:  $45.88 \pm 6.64$  de N,  $4.16 \pm 0.96$  de P,  $49.69 \pm 12.2$  de K,  $19.98 \pm 4.65$  de Ca,  $6.59 \pm 1.21$  de Mg,  $0.09 \pm 0.01$  de Fe,  $0.01 \pm 0.003$  de Cu y  $0.16 \pm 0.04$  de Mn. El rendimiento es dependiente significativamente ( $p \leq 0.05$ ) de la concentración de P, de manera negativa. Sin embargo, el N parece ser el nutrimento más limitante de la producción de chile pimiento en invernadero. El cultivo tiene una demanda diferente de N en invernadero con respecto a los sistemas de producción en campo.

**PALABRAS CLAVE:** *Capsicum annuum*; Invernadero; Solución nutritiva Steiner

PRELIMINAR COMPOSITIONAL NUTRIENT DIAGNOSIS NORMS AND NUTRIENT  
CORRELATIONS IN CHILI (*Capsicum annuum*)

Leopoldo Arroyo Vargas, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2011

Abstract

Chili is one of the most important crops in Mexico. Its importance relies on required journals and on the fact most of the fruit production is for exportation. From 2000 to 2009, fresh production was increased from 1734 to 2055 thousand tons, however, with a lot of health problems. There is known, healthy plants avoid easily plant diseases. Thus, balanced nutrient quantity must be provided to the plants. In this context, it is important to account with nutrient norms and to be able to perform correct nutrient diagnosis. Then aims of this study were to determine compositional nutrient diagnosis (CND) standards and to identify important correlations between nutrients and yield. Thus, one experiment under greenhouse conditions was carried out taking into account a Steiner nutrient solution at three concentration levels. Each experimental unit was composed by 12 plants distributed throughout four randomized blocks. Fruit fresh matter was considered as yield when three cuts were performed. Tissues (mature leaves) from plants were sampled to quantify nutrient (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu and Mn) concentrations. CND norms were computed using such a database. Pearson correlations were computed in order to identify those significant. Row-centered log ratios (CND norms, mean  $\pm$  1 standard deviation) for  $d = 8$  nutrients under the basis of high-yield subpopulation ( $n = 19$ , yield  $> 1333.33 \text{ g plant}^{-1}$ ) are:  $V_N^* = 2.51 \pm 0.17$ ,  $V_P^* = 0.09 \pm 0.14$ ,  $V_K^* = 2.57 \pm 0.25$ ,  $V_{Ca}^* = 1.66 \pm 0.16$ ,  $V_{Mg}^* = 0.56 \pm 0.13$ ,  $V_{Fe}^* = -3.76 \pm 0.11$ ,  $V_{Cu}^* = -5.96 \pm 0.25$ ,  $V_{Mn}^* = -3.13 \pm 0.14$  y  $V_{R_s}^* = 5.46 \pm 0.12$ . And their corresponding sufficiency ranges (mean  $\pm$  1 standard deviation,  $\text{g Kg}^{-1}$ ) are:  $45.88 \pm 6.64$  for N,  $4.16 \pm 0.96$  for P,  $49.69 \pm 12.2$  for K,  $19.98 \pm 4.65$  for Ca,  $6.59 \pm 1.21$  for Mg,  $0.09 \pm 0.01$  fore Fe,  $0.01 \pm 0.003$  for Cu and  $0.16 \pm 0.04$  fore Mn. Yield depended significantly ( $p \leq 0.05$ ) on P concentration, in a negative way. However, it appears N was the most limiting nutrient under greenhouse conditions. Nitrogen requirement was diferent level when compared with the same species grown under field conditions.

**KEY WORDS:** *Capsicum annuum*; Greenhouse; Steiner nutrient solution

# DEDICATORIA

*A la Memoria de Mi Madre*

*ESTHER VARGAS GONZALEZ*  
*Que En Paz Descanse*

*Quien fue y seguirá siendo por siempre el pilar más fuerte en mi existencia*

*Por el gran ejemplo de vida que me dejo*

*Por el enorme dolor que me ha causado su ausencia*

*Por su inmenso valor y fortaleza mostrados aun cuando la vida se le escapaba de entre las  
manos*

*Para ti MAMÁ donde quiera que te encuentres con todo mi AMOR, RESPETO Y  
ADMIRACION*

A mi Padre **Leopoldo Arroyo Martínez**

Por el apoyo e interés mostrado en mi superación primeramente como persona y después como profesionalista.

A mi Novia **Irma Hernández Aguilar**

Por compartir su vida conmigo proporcionándome los momentos más felices de mi existencia, así como por ser mi mayor apoyo en momentos difíciles y amargos que he vivido.

A mi Hermanos y Hermanas: **Gregorio, Zeferino, Esther, Isabel, Lidia y Silvia**

Por mostrarme el camino a seguir para triunfar y superarme.

De manera especial a mis Hermanas **Cande y Martha**, así como a mi hermano **Eduardo**

Por siempre estar allí dispuestos a extenderme la mano en momentos difíciles, a escucharme cuando lo he necesitado, de corazón gracias hermanos.

A mi Amigo **Ibar Felipe**

Por ser uno más de mis hermanos, aconsejándome y mostrando su apoyo incondicional para conmigo, gracias por todo “JEFE”

A todos mis **sobrinos**

Por compartir momentos, aunque pocos pero de calidad con su tío POLO

# *A G R A D E C I M I E N T O S*

Primeramente a **DIOS**, por prestarme vida para alcanzar una meta más en mi trayectoria académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) que conjuntamente con el Colegio de Postgraduados me brindaron la oportunidad de cursar un postgrado.

Al Dr. Ricardo David Valdés Cepeda, por su apoyo, dedicación e interés mostrados, con los cuales fue posible llevar a buen término el presente trabajo de investigación.

Al Dr. Juan Luis Tirado Torres, a quien le reconozco sus consejos, sugerencias y acertadas observaciones durante mi estancia en la institución.

Al Dr. Víctor Volke Haller, por el tiempo dedicado a la elaboración de la presente investigación así como por sus atinadas observaciones que contribuyeron a la mejora de la investigación realizada.

Y finalmente a todos los Doctores con quien tuve el gusto de compartir el aula en los cursos tomados, aprendiéndoles un poco de los muchos conocimiento que cada uno de ellos poseen.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>v</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b>	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>3</b>
2.1. Diagnóstico de Nutritional	3
2.2. Análisis Foliar	3
2.3. Métodos de diagnóstico	4
2.3.1. Métodos de Diagnóstico Cualitativos	4
2.3.1.1. Síntomas visibles de alteraciones nutricionales	4
2.3.2. Métodos Cuantitativos	7
2.3.2.1. Nivel crítico	7
2.3.2.2. Intervalo de suficiencia	7
2.3.2.3. Índices de balance Kenworthy	7
2.3.2.4. Diagnóstico diferencial integrado	9
2.3.2.5. Sistema integrado de diagnóstico y recomendación	10
2.3.2.6. Método de diagnóstico nutricional compuesto	12
2.4. Importancia de la Producción de Hortalizas en Invernadero	13
<b>III. CONCLUSION DE LA REVISION BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
<b>IV. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>V. HIPÓTESIS</b>	<b>16</b>
<b>VI. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>17</b>
6.1. Ubicación del estudio	17
6.2. Condiciones experimentales	17
6.3. Establecimiento del experimento	17



6.4.	Solución nutritiva	18
6.5.	Muestreo de tejido vegetal y análisis	18
6.6.	Estimación de las normas preliminares	21
6.7.	Selección de la subpoblación de alto rendimiento	22
6.8.	Interacciones nutrimentales	24
<b>VII.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>25</b>
7.1.	Estadísticas descriptivas del rendimiento	25
7.2.	Normas de diagnóstico nutrimental compuesto	25
7.3.	Correlaciones entre nutrimentos y rendimientos	32
<b>VIII.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>38</b>
<b>IX</b>	<b>LITERATURA CITADA</b>	<b>39</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Síntomas visibles de alteraciones nutrimentales	6
Cuadro 2. Intervalos de suficiencia de la concentración de nutrientes en tejidos vegetales de distintos tipos de planta	8
Cuadro 3. Fuente y concentración de los macronutrientes en la solución Steiner.	19
Cuadro 4. Fuente y concentración de los micronutrientes en la solución Steiner	20
Cuadro 5. Estimadores estadísticos descriptivos de las variables rendimiento y concentraciones nutrimentales en tejido vegetal de pimiento (n = 144)	26
Cuadro 6. Modelos cúbicos y rendimiento en los puntos de inflexión ( $-b/3a$ ) para cada función asociada a la proporción de logaritmos centrados en la población analizada (n=144).	28
Cuadro 7. Normas preliminares (Media y Desviación estándar, DE de las $V_x^*$ ) de diagnóstico nutrimental compuesto (DNC) para d = 8 nutrientes y rangos de concentración óptimos (concentración media y desviación estándar, DE) en pimiento con un rendimiento de referencia de $1333.33 \text{ g PI}^{-1}$ .	29
Cuadro 8. Concentraciones nutrimentales óptimas citadas en la literatura para especies del género <i>Capsicum</i> .	34
Cuadro 9. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre rendimiento y concentración de nutrientes en tejido vegetal de pimiento.	35
Cuadro 10. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre rendimiento y concentración de nutrientes en tejido vegetal de pimiento, en la subpoblación de altos rendimientos.	36
Cuadro 11. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre rendimiento y concentración de nutrientes en tejido vegetal de pimiento, en la subpoblación de bajos rendimientos.	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Relaciones cúbicas experimentales entre el rendimiento de pimiento, y las funciones de proporción de varianza acumulada en el arreglo $S^8$ para estimar el punto de inflexión y el rendimiento crítico para separar a las sub-poblaciones de alto y bajo rendimiento.	27
Figura 2	Función de distribución acumulada de $\chi^2$ con ocho grados de libertad para obtener el valor crítico teórico de DNC $r^2$ en el arreglo $S^8$ asociado al 86.8% de la población (subpoblación de bajo rendimiento).	30

## 1. INTRODUCCION

El chile es uno de los principales cultivos hortícolas en México y de gran consumo por la población. En año 2008 ocupó el segundo sitio en producción mundial después de China, su importancia en la economía nacional, radica en ser el decimo producto agrícola en valor de su producción, siendo de 709148 miles de pesos con producción de 2055 miles de toneladas, obtenidas de 133 mil hectáreas cosechas con rendimiento de 15.5 toneladas por hectárea (FAO, 2011). Su importancia social reside en el hecho de ser un cultivo intensivo que requiere una elevada cantidad de mano de obra de 120 a 200 jornales por hectárea cosechada aproximadamente (Long *et al.*, 1998).

Los tipos de chiles de mayor importancia en México son: los anchos, jalapeños, serrano, mirasol (conocido como guajillo en seco) y pimienta o campana (Long *et al.*, 1998). El pimienta se destina para su consumo en fresco al interior del país pero la mayor parte es exportada hacia los Estados Unidos. La producción de chile en fresco osciló de 1734 a 2055 miles de toneladas del año 2000 al 2008, respectivamente (SAGARPA, 2010).

Dada la importancia del cultivo del pimienta han surgido nuevas tecnologías para su producción con el propósito de obtener mayores rendimientos, tanto en cantidad como en calidad. Para cumplir estos objetivos es importante tener plantas bien nutridas y sanas. La nutrición del cultivo es uno de los aspectos de mayor importancia, ya que una planta bien nutrida es más tolerante a organismos patógenos. El entendimiento de los mecanismos que contribuyen a la absorción, transporte, síntesis y acumulación de nutrimentos en las plantas de chile bajo diversos ambientes es esencial para mejorar su estado nutricional, en términos de composición y concentración de nutrimentos (Marschner, 1995).

Existen varios métodos de diagnóstico del estado nutricional de la planta como lo son: Valor Crítico, CV (Bates, 1971), Sistema integrado de diagnóstico y recomendación, DRIS (Walworth y Sumner, 1987) y Diagnóstico Nutricional Compuesto, DNC (Parent y Dafir, 1992).

En el caso de la técnica DRIS no se ha establecido un procedimiento formal para dividir el total de las observaciones en dos grupos: un de altos rendimientos y otro de bajos rendimientos. Esa división se contempla en la técnica de DNC al considerar la relación cúbica entre el rendimiento y cada una de las funciones de proporción de varianza acumulada (Parent y Dafir, 1992); es decir, usa relaciones con respecto a la composición total ya que se considera un nutrimento (R) que

representa al resto de los elementos no considerados en el análisis y define un punto mínimo de rendimiento a partir del cual se definen las subpoblaciones de alto y bajo rendimiento. Khiari *et al.* (2001b) han demostrado que los índices nutrimentales estimados con la metodología de DNC se distribuyen simétricamente con respecto a un valor nulo de balance nutrimental y también se correlacionan mejor con el rendimiento en comparación de los estimados a través de las técnicas DRIS y CV.

El método de DNC se ha aplicado en los tipos “güero” (García *et al.*, 2004) y “mirasol” (Valdez *et al.*, 2005) de *Capsicum annuum* y en la especie *Capsicum frutescens* que está en proceso de domesticación y mejoramiento debido a sus sobresalientes características físicas y bioquímicas y su alta tolerancia a condiciones de sequía y salinidad (García *et al.*, 2007). Además se ha aplicado a otros cultivos como: papa (Khiari *et al.*, 2001), nopal (Magallanes *et al.*, 2005; Blanco *et al.*, 2006), frijol cowpea (García *et al.*, 2005), sábila (García *et al.*, 2006), maíz (Magallanes *et al.*, 2006) y nogal pecanero (García *et al.*, 2009). Con base en estos antecedentes el método de DNC se ha considerado como apropiado para diagnosticar el estado nutrimental de las plantas cultivadas. De lo anterior se deriva la importancia de generar normas preliminares, para macros y micronutrientes mediante la técnica DNC con base en el rendimiento de fruto fresco en el cultivo de chile pimiento, así como identificar la dependencia del rendimiento en chile pimiento fresco de los nutrientes y las correlaciones principales entre los nutrientes.

## **II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Diagnóstico Nutrimental**

El diagnóstico nutrimental de las plantas se realiza fines de estimar el estado nutrimental de un cultivo y predecir sus necesidades nutrimentales. Puede dividirse en dos etapas: la primera es la de obtención de datos, fundamentalmente por análisis químico de tejido vegetal (análisis foliar), que puede complementarse con el análisis del suelo, sin embargo en cultivos perennes y cultivos sin suelo se considera principalmente el análisis de los tejidos. La segunda etapa es la de interpretación de resultados, en la que se comparan los datos del análisis con valores de referencia. Esta comparación se puede hacer según distintos criterios que dan lugar a los diferentes métodos de diagnóstico (Gárate y Bonilla, 2001).

### **2.2. Análisis foliar**

El empleo del análisis químico del material vegetal, con el fin de realizar un diagnóstico de nutrición, se basa en el hecho de que existe una relación entre el crecimiento de las plantas y el contenido nutrimental en la materia vegetal seca o fresca (Gárate y Bonilla, 2001). Jones *et al.* (1991) mencionaron que el estado nutrimental de una planta se refleja mejor por el contenido de los elementos de las hojas que por el de otros órganos. No obstante, distintos factores, como el tipo de elemento, la edad y la especie vegetal, pueden hacer recomendable un muestreo de otro órgano o parte de la planta.

El uso de hojas jóvenes es sólo aconsejable para nutrientes que presentan un grado reducido de movilidad desde las hojas adultas hacia zonas de nuevo desarrollo, como lo son: calcio, azufre, hierro, manganeso, boro y cobre (Taiz y Zeiger, 1998). La situación es otra para los elementos potasio (K), nitrógeno (N) y magnesio (Mg), puesto que sus contenidos permanecen estables en hojas jóvenes. Para estos nutrientes móviles, son las que mejor indican el estado nutricional de la planta. Si se sospecha que pueden existir problemas de toxicidad, las hojas adultas son las más recomendables para el análisis foliar (Gárate y Bonilla, 2001).

El análisis mineral de la hoja o de un tejido vegetal se realiza en tres etapas (Jones *et al.*, 1991):

1. La toma de muestra vegetal es clave para la validez de todo el diagnóstico de nutrición. Es necesario establecer un procedimiento de muestreo que asegure un material vegetal comparable y que considere los factores que afectan al contenido de nutrientes en órganos y tejidos. El

muestreo debe realizarse por cultivos, dada las diferencias existentes, por ejemplo, entre un frutal y una hortaliza.

2. La preparación de la muestra, previa al análisis químico, contempla los siguientes pasos: a) el transporte al laboratorio, generalmente en envases plásticos; b) el lavado de la muestra con agua destilada, sobre todo si se trata de muestras de plantas desarrolladas en condiciones de campo, manchadas con polvo o rociados foliares; y c) el secado y molido, si, como sucede normalmente, el análisis se hace a partir de material seco.

3. El análisis foliar, propiamente dicho, consiste en una mineralización de la materia orgánica vegetal por vía seca o por vía húmeda. En la vía seca, la muestra de hoja se reduce a cenizas en un horno–mufla y, posteriormente, éstas sufren una digestión ácida, para finalmente realizar el análisis de nutrimentos en el extracto resultante. En la vía húmeda, el tejido vegetal se trata con una mezcla de ácidos, sulfúrico, nítrico y clorhídrico, fundamentalmente. Los nutrimentos Fe, Cu, Mn, Zn y Mo se determinan por espectrometría de absorción atómica, el K, Na, Ca y Mg por emisión por llama o por plasma inducido (todos ellos), mientras que los nutrimentos N, P y B se analizan por colorimetría. Actualmente existen otros métodos capaces de medir conjuntamente aniones y cationes, entre los que podemos destacar la cromatografía líquida (HPLC) y la electroforesis capilar.

### **2.3. Métodos de diagnóstico**

Los métodos de diagnóstico pueden ser cualitativos, por observación de los síntomas visibles de alteraciones nutricionales, o cuantitativos, basados en los resultados del análisis químico del material vegetal, por comparación con normas o valores de referencia.

#### **2.3.1. Métodos de diagnóstico cualitativos**

##### **2.3.1.1. Síntomas visibles de alteraciones nutrimentales**

Las alteraciones nutrimentales que reducen ligeramente el crecimiento y la producción no presentan síntomas visibles claros. Normalmente, los síntomas se hacen patentes cuando la deficiencia nutrimental es aguda y el ritmo de crecimiento y la producción disminuyen significativamente. Muchas especies vegetales, sobre todo las adaptadas a lugares pobres en nutrimentos, ajustan su crecimiento al nutrimento limitante, con lo que no se desarrollan síntomas visibles (Jones *et al.*, 1991).

Gárate y Bonilla (2001) indican que con objeto de diferenciar los síntomas de alteraciones nutrimentales de otros síntomas, es importante considerar que los causados por alteraciones nutrimentales tienen siempre un patrón de distribución simétrico: las hojas de una planta en posiciones iguales o similares, de la misma edad fisiológica, presentarán una distribución de síntomas casi idéntica.

El diagnóstico del estado nutrimental de una planta basado en los síntomas visibles requiere una aproximación sistemática, como se resume en el Cuadro 1. Los síntomas aparecen, preferentemente, en hojas jóvenes o viejas, en función de la capacidad del nutrimento para movilizarse por el floema (Gárate y Bonilla, 2001).

La clorosis (amarillamiento de las hojas) y la necrosis (manchas de color variable, normalmente de marrón a negro), así como el patrón de distribución de ambas son criterios importantes en el diagnóstico nutrimental. Como norma general, los síntomas visibles de la deficiencia de un nutrimento son más específicos que los de su toxicidad (Gárate y Bonilla, 2001).

El diagnóstico puede ser especialmente complicado en cultivos agrícolas y en condiciones de campo, cuando se encuentra más de un nutrimento en un nivel deficiente, o cuando se producen simultáneamente la deficiencia de un nutrimento y la toxicidad de otro. También se complica el diagnóstico basado en los síntomas visibles con la presencia de plagas y enfermedades, o por otros daños provocados, por ejemplo, por el uso de aspersiones foliares (Jones *et al.*, 1991).



**Cuadro 1. Síntomas visibles de alteraciones nutrimentales.**

Parte de la planta	Síntoma predominante	Deficiencia Nutrimental	
Hojas adultas	Clorosis	Uniforme	N, S
		Intervenal	Mg, Mn
	Necrosis	Bordes y puntas	K
		Intervenal	Mg, Mn
Hojas jóvenes y ápices	Clorosis	Uniforme	Fe, S
		Intervenal o en manchas	Zn, Mn
	Necrosis (o clorosis)		Ca, B, Cu
	Deformaciones		Mo, Zn, B
.....			
		<b>Toxicidad Nutrimental</b>	
Hojas adultas	Necrosis	Manchas	Mn, B
		Bordes y puntas	B, salinidad
	Clorosis, necrosis		Toxicidad inespecífica

Adaptado de Marschner (1995).

## **2.3.2. Métodos Cuantitativos**

### **2.3.2.1. Nivel crítico**

El nivel crítico (NC) se fundamenta en la correlación que existe entre el crecimiento y el rendimiento de los cultivos con la composición química del follaje. Dow y Roberts (1982) definen al valor crítico como la concentración mínima requerida para un máximo crecimiento. Es el más comúnmente utilizado y se basa en la comparación de la concentración de un nutrimento obtenida por análisis foliar con un valor de referencia que se denomina nivel crítico que corresponde al 90% del máximo de cosecha en peso seco. El problema es que los valores de referencia no son universales y, en consecuencia, no pueden aplicarse directamente a los mismos cultivos en distintas zonas geográficas. El método presenta serias limitaciones ya que las concentraciones de los nutrimentos sufren fluctuaciones por efecto de distintos factores. Es más lógico y realista usar un intervalo de referencia en lugar de un NC (Gárate y Bonilla, 2001).

### **2.3.2.2. Intervalo de suficiencia**

El intervalo de suficiencia (IS) tiene la misma base que el método del nivel crítico, solo que la comparación del dato analítico se hace frente a un intervalo de concentraciones del nutrimento que no implican reducción en la producción. En el cuadro 2 se aprecian intervalos de concentración de nutrimentos adecuados o suficientes (IS) para distintas especies vegetales. Los intervalos de macronutrimentos son de órdenes de magnitud similares en las distintas especies. El Ca es una excepción, pues presenta un contenido sustancialmente menor en monocotiledóneas. En todas las especies, el intervalo es relativamente estrecho para el N, ya que los contenidos altos de N tienen efectos desfavorables en el crecimiento y la composición de la planta. Los contenidos de micronutrimentos en los intervalos de adecuación varían por un factor de 2 o mayor. El Mn es el nutrimento que muestra el intervalo más amplio (Gárate y Bonilla, 2001).

### **2.3.2.3. Índices de balance Kenworthy**

Esta técnica fue desarrollada por Kenworthy (1961), quien definió el valor estándar como el valor igual a la media de la concentración nutrimental de hojas muestreadas en un estado particular, de árboles que tuviesen un desarrollo hortícola deseable. Para generar el estándar se selecciona el 10 % superior de una población que exhiba un atributo deseado (e.g. altos rendimientos) y un coeficiente de variación (CV) menor de 34%.

**Cuadro 2. Intervalos de suficiencia de la concentración de nutrimentos en tejidos vegetales de distintos tipos de planta.**

Especie	Contenido (% base peso seco)					Contenido (mg kg <sup>-1</sup> peso seco)				
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Cu	B	Mo
Trigo (toda la parte aérea)	3.0–4.5	0.3–0.5	2.9–3.8	0.4–1.0	0.15–0.3	30–100	20–70	5–10	5–10	0.1–0.3
Maíz (hoja madura) <sup>a</sup>	2.7–3.5	0.4–0.7	2.5–3.5	0.7–1.0	0.2–0.5	30–300	20–150	5–25	8–25	0.5–1.0
Remolacha (hoja madura)	4.0–6.0	0.35–0.6	3.5–6.0 <sup>b</sup>	0.7–2.0	0.3–0.7	40–100	20–80	7–15	40–100	0.25–1.0
Algodón (hoja madura)	3.6–4.7	0.3–0.5	1.7–3.5	0.6–1.5	0.35–0.8	35–100	25–80	8–20	20–80	0.6–2.0
Tomate (hoja madura)	4.0–5.5	0.4–0.65	3.0–6.0	3.0–4.0	0.35–0.8	40–100	30–80	6–12	40–80	0.3–1.0
Alfalfa (parte aérea superior)	3.5–5.0	0.3–0.6	2.5–3.8	1.0–2.5	0.3–0.8	30–100	25–70	6–15	35–80	0.5–2.0
Manzano (hoja madura)	2.2–2.8	0.18–0.3	1.1–1.5	1.3–2.2	0.2–0.35	35–100	20–50	5–12	30–50	0.1–0.3
Naranja (hoja madura)	2.4–3.5	0.15–0.3	1.2–2.0	3.0–7.0	0.25–0.7	25–125	25–60	6–15	30–70	0.2–0.5
Abeto (acículas de 1–2 años)	1.35–1.7	0.13–0.25	0.5–1.2	0.35–0.8	0.1–0.25	50–500	15–60	4–10	15–50	0.04–0.2

(a) De Jones *et al.* 1991.

(b) Contenido de Na menor a 1.5%.

Adaptado de Marschner, 1995.

Kenworthy (1967) propuso que las concentraciones nutrimentales en una muestra se expresan como porcentaje del valor estándar y se ajusten mediante el CV del estándar. Los resultados de concentraciones nutrimentales de árboles o huertos manejados mediante índices de balance, uniformizan su valor, permitiendo hacer comparaciones más fáciles y objetivas entre los nutrimentos (Kenworthy, 1961). Según Sumner y Boswell (1981), este método lista los nutrimentos en un orden de requerimiento y evalúa el balance entre ellos, pero presenta algunas desventajas como son: la interpretación es afectada por el tipo y posición de hoja en la planta, los estándares nutrimentales deben obtenerse de una población homogénea para una etapa de crecimiento del cultivo, lo que obliga a diagnosticar sólo para el estado de crecimiento en el cual se obtuvo el estándar.

#### **2.3.2.4. Diagnóstico diferencial integrado**

La aportación más valiosa del diagnóstico diferencial integrado (DDI) frente a otras metodologías es su fundamento fisiológico que permite distinguir la naturaleza nutrimental o fisiológica de la deficiencia mediante el estudio de las relaciones nutrimentales de plantas enfermas y sanas, y propiciar a la brevedad posible las medidas de corrección. Los puntos de vista fisiológicos y los principios que rigen absorción de nutrimentos y el crecimiento vegetal permiten sentar las bases para distinguir entre una deficiencia nutricional y una deficiencia fisiológica, la primera atribuida a la relación suelo-planta, y la segunda, más compleja, asociada a la relación planta-atmósfera (Uvalle, 1996).

La implementación del DDI demanda la estratificación de potenciales productivos con la diferenciación de poblaciones de alto y bajo rendimiento y una evaluación técnica y socioeconómica de la desviación en los niveles de producción y/o calidad.

Uvalle (1996) menciona que con el DDI se elaboran escalas de valores de referencia de los nutrimentos esenciales de diferentes órganos y etapas fenológicas. También se desarrollan índices para jerarquizar las propiedades del suelo de mayor a menor desviación de las condiciones óptimas para el cultivo. Se analiza el agua como factor de producción en cuanto a su calidad, cantidad, oportunidad y técnica de aplicación. La información meteorológica se emplea para conocer el presupuesto de unidades calor por etapa fenológica y facilitar la interpretación de perturbaciones biológicas (virus, micoplasma, bacterias, hongos, insectos, etc.).

Una vez identificada la naturaleza del desorden y jerarquizados los factores limitantes de la producción, se procede a atender la intensidad de la labranza de la preparación del terreno y se elaboran programas de fertilización fenológica balanceada que se ajusta durante el desarrollo del cultivo en base a un detallado monitoreo de la situación nutrimental con apoyo del análisis vegetal (Uvalle, 1996).

#### **2.3.2.5. Sistema integrado de diagnóstico y recomendación**

El sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS por sus siglas en inglés) es un método de deficiencias y desbalances de la composición mineral del tejido vegetal. Su fundamento considera el uso de relaciones de nutrimentos para el cálculo de índices que reflejan el estado nutrimental del cultivo, deficiencia o exceso, independientemente de la edad de las hojas (Sanchez *et al*, 2007).

Existen numerosas interacciones específicas e inespecíficas entre los nutrientes minerales de las plantas que afectan a las concentraciones de nutrimentos y a la producción vegetal. Así, con contenidos bajos de P en maíz, un aumento de N en la hoja bandera del 2.1 al 2.9% tiene poco efecto en la producción y, sin embargo, con altos contenidos en P, la producción crece cuando el porcentaje de N en la hoja bandera es mayor a 3.0% (Gárate y Bonilla, 2001).

Gárate y Bonilla (2001) manifiestan que las interacciones entre dos nutrimentos son importantes cuando los contenidos de ambos se encuentran cercanos al intervalo de deficiencia. El aumento del aporte de uno de los nutrimentos estimula el crecimiento, lo que podría provocar o inducir la deficiencia del otro por un efecto de dilución. En principio, estas interacciones inespecíficas son válidas para cualquiera de los nutrimentos minerales de las plantas. Por tanto, las relaciones óptimas entre nutrimentos son frecuentemente tan importantes como los contenidos absolutos.

Por ejemplo, una relación N/S próxima a 17 se considera adecuada para la nutrición azufrada de trigo y soya. Sin embargo, las relaciones óptimas consideradas de forma aislada son insuficientes, porque pueden conseguirse cuando ambos nutrimentos se encuentren en intervalos deficientes, o bien, en los de toxicidad.

Dada la importancia de la relación de nutrimentos en el análisis de la planta con fines de diagnóstico, se ha introducido el concepto: Sistema Integrado de Diagnóstico y Recomendación (DRIS). El sistema se basa en el registro del mayor número posible de datos respecto a los

contenidos de nutrimentos minerales en la planta (hasta ahora, macronutrimentos), y el uso de esos datos para el cálculo de relaciones óptimas entre nutrimentos (índices nutrimentales o relaciones normalizadas), por ejemplo, las relaciones N/P, N/K, etc. Los índices de nutrimentos calculados por DRIS son menos sensibles a los cambios que se producen durante la maduración de la hoja y la ontogénesis, pero dependen en cierto grado de la localización geográfica (Gárate y Bonilla, 2001).

El DRIS asume que todas las posibles relaciones nutrimentales en un tejido de la planta son potencialmente parámetros determinantes del rendimiento. La media y la varianza de esos parámetros deben ser determinados en poblaciones de altos y bajos rendimientos (Jones, 1981).

Jones (1981) indica que puede obtenerse un índice DRIS para cada nutrimento. Este índice está basado en la desviación media de cada relación importante respecto a un valor óptimo (en donde se alcanzan los mejores rendimientos). Así, el índice DRIS óptimo para cualquier nutrimento es 0.0, índices negativos indican deficiencia e índices positivos indican suficiencia, con lo cual podemos determinar qué relación tiene más probabilidad de respuesta.

DRIS usa índices para cada nutrimento, calculados de la media aritmética de funciones donde las proporciones entre todos los pares de elementos son consideradas (Walworth y Sumner, 1987). Hay una buena correlación inversa entre rendimiento y la sumatoria de todos los índices en valor absoluto, esto implica que un buen balance de nutrimentos es más importante para un alto rendimiento que el efecto de un solo nutrimento. Varias modificaciones han sido propuestas tal como M-DRIS, que considera materia seca (M) como otro componente a usar en las proporciones de nutrimentos (Walworth *et al.*, 1986) y Log-DRIS, donde una expresión diferente es usada en orden para eliminar el efecto de curtosis en el coeficiente de variación que sucede con las normas DRIS tradicionales (Beverly, 1987).

Uno de los problemas encontrados con el uso de DRIS es que hay pocas normas y no se toman en cuenta todos los elementos, al parecer se regresa al tiempo en que solo N, P, K, Ca y Mg eran considerados como nutrimentos de las plantas, además de que cuando se trata de usar más elementos el número de cálculos crece considerablemente (Lucena, 1997).

Las proporciones normalizadas o índices nutritivos son valores medios obtenidos a partir de varios miles de experimentos de campo. Actualmente, el uso de modelos informatizados facilita la obtención y manejo de estos índices. Para determinados cultivos y en ciertas condiciones

(lugares de alta producción, sistemas de cultivo a gran escala), una elevada inversión económica en aspectos analíticos puede resultar rentable, ya que el DRIS permite una interpretación más fina de los resultados y, por tanto, una adecuada recomendación de abonado (Gárate y Bonilla, 2001).

#### **2.3.2.6. Método de diagnóstico nutrimental compuesto**

La técnica del método de diagnóstico nutrimental compuesto (DNC) fue desarrollada en Canadá por Parent y colaboradores (Parent y Dafir, 1992, Parent *et al.*, 1994 y 1995 y Tremblay *et al.*, 1993). Involucra el cálculo de índices individuales para cada elemento, pero considera su proporción respecto a la media geométrica (G) de todos los nutrientes. También considera a R que representa el resto de los nutrientes no considerados en el análisis químico; R corresponde, por ejemplo, a C, H y O, y es un parámetro más trascendente que el componente “materia seca” usado en el M-DRIS.

En el caso de la técnica de valor crítico, un valor de referencia de rendimiento es definido arbitrariamente para señalar a la población con altos rendimientos; generalmente se considera el 90 o el 95% del rendimiento máximo y se supone que excepto el nutriente del caso, los demás están en cantidades suficientes y no excesivas. En los casos de DRIS y CND, la población de altos rendimientos se selecciona de una base de datos. Con respecto al sistema DRIS no se ha establecido un procedimiento formal para dividir las observaciones en dos grupos: uno de altos rendimientos y otro de bajos rendimientos. En cambio, esa partición se sustenta en la función de distribución de chi-cuadrada ( $\chi^2$ ) de los índices de nutrición global y a la relación cúbica entre los rendimientos y las funciones de proporción de varianza acumulada en el caso de la técnica de Diagnóstico de Nutriente Compuesto (Parent y Dafir, 1992).

Una ventaja del DNC, con respecto a DRIS, es que usa proporciones de elementos respecto a la composición total. Como consecuencia, el efecto de la variabilidad que un solo nutriente tiene en el resto de los componentes, es incluido como un efecto global y no como varios efectos individuales sobre cada otro nutriente. Además, los cálculos son muy sencillos, aún cuando se usan todos los elementos esenciales y los no esenciales en la planta. Solo se necesita calcular el factor G para la muestra y hacer un fácil cálculo del índice. Una distancia Euclidiana, como indicativo del balance global de la planta, es además incluido y parece estar mejor relacionado al rendimiento que el parámetro sumatoria del DRIS. A pesar de que éste diagnóstico no está

extendido, puede ser fácilmente aplicado dado que puede usar las mismas normas que DRIS, si la desviación estándar para cada elemento individual es conocida (Lucena, 1997).

#### **2.4. Importancia de la Producción de Hortalizas en Invernadero**

México es un país con una gran diversidad de condiciones agroclimáticas, sociales y económicas, factores que hacen difícil encontrar un sistema único de producción en el sector agrícola. Con el manejo agronómico tradicional a cielo abierto en la producción de hortalizas (jitomate, chile, pimiento, pepino, entre otros) se ha observado que se obtiene menor rendimiento y la calidad del producto no es la óptima, esto hace necesario implementar tecnologías de vanguardia que permitan elevar el rendimiento y la calidad del producto, además de proteger el ambiente disminuyendo el uso de productos agroquímicos y la optimización del uso de los recursos naturales.

Los sistemas protegidos pueden representar una opción al respecto, ya que entre las ventajas que proporcionan están: el incremento de la producción de alimentos inocuos; mayor control sobre algunas variables climáticas; el manejo eficiente de fertilizantes; y la optimización del recurso agua, entre otros.

La producción de hortalizas en invernadero ha atraído la atención en los últimos años. La atracción se basa en la percepción de que los sistemas de producción de hortalizas en invernadero pueden ser más rentables que los sistemas de cultivos hortícolas convencionales (Snyder, 2006). La producción agrícola intensiva en invernaderos posibilita tener controlados todos los factores que inciden en la producción de hortalizas como es el caso de: oxígeno, agua, nutrientes, humedad atmosférica, temperatura, viento, plagas y enfermedades. De esta manera, la incertidumbre a diferencia de la agricultura a cielo abierto es mucho menor, teniendo como consecuencia mejores rendimientos y mayor calidad de las hortalizas cultivadas.

Según un análisis de la Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria y Forestal, A.C. (FuMIAF, 2006), en el año 2005 la superficie de invernaderos en el país era de unas tres mil hectáreas, con 70% dedicada al cultivo de tomates y 15% al cultivo de pimiento.

El cultivo de pimiento en invernaderos de alta tecnología tiene un gran potencial en México, ya que apenas cubre 10% del abasto en Estados Unidos de América (EUA), mientras que Canadá abastece 44% de ese mercado y Holanda contribuye con el 40%. Pese a sus ventajas naturales y



de cercanía, nuestro país se ha marginado a sí mismo, de uno de los mercados más cotizados del mundo, el estadounidense, que sólo produce 6% de su consumo. México, no obstante, es el principal proveedor de pimiento fresco de campo abierto hacia el mercado estadounidense, donde las oportunidades para el pimiento son crecientes.

De acuerdo con la FuMIAF (2006), aunque México entró a la industria después que Canadá, hoy tiene una superficie de producción mayor a la canadiense. No obstante, sus rendimientos promedio son menores a los observados en Canadá y Holanda, naciones que sólo utilizan alta tecnología.

Los principales productos de exportación mexicana en términos de participación son berenjena, fresa, pepino, coliflor, tomate, pimientos, mango y lechuga. Estos nueve productos representan el 31% del total de exportaciones mexicanas hacia EUA; sin embargo, solo representa el 4.2% del total de importaciones de EUA. Cabe señalar que las principales hortalizas que componen el 75% de la oferta exportable son: tomate, 30.2%; pepino, 11.2%; melón, 9.7%; sandía, 9.7%; chile campana, 5.8%; y calabazas, 8.4% (FuMIAF , 2005).

Por otro lado, al analizar las exportaciones de hortalizas de los estados se aprecia que Sinaloa contribuye con casi la mitad de las exportaciones en el ámbito nacional. Del resto de los estados, no hay uno solo que exporte por lo menos la mitad de lo que exporta Sinaloa (Siller, 2006). Es obvio que existe un mercado internacional cuya demanda de productos hortícolas aún no se satisface, lo cual representa una oportunidad importante para el crecimiento del sector agrícola.

### **III. CONCLUSION DE LA REVISION BIBLIOGRAFICA**

La producción agrícola intensiva en invernaderos controla todos los factores que involucra la producción de hortalizas; uno de ellos es la nutrición del cultivo. Para suministrar los nutrimentos en cantidades óptimas a las plantas se requiere hacer un diagnóstico nutrimental, según los diferentes métodos cualitativos y cuantitativos. Los métodos cualitativos se aplican bien siempre y cuando se tenga suficiente experiencia en el manejo agronómico del cultivo para evitar la confusión de los síntomas de deficiencia con otros como los causados por patógenos. Los métodos cuantitativos se basan en los resultados del análisis químico del material vegetal para su comparación con normas o valores de referencia. Entre los más importantes y, sobre todo, con mayor sustento teórico se menciona a los métodos DRIS y DNC. El último tiene las ventajas de calcular índices individuales para cada nutrimento pero usando su relación respecto de la media geométrica, G y otros componentes del material vegetal mediante R que representa el resto de los elementos no considerados en el análisis químico y puede dividir la población total en subpoblaciones de alto y bajo rendimiento con un fundamento estadístico robusto, a diferencia de otros métodos que esta división la hacen arbitrariamente.

#### **IV. OBJETIVOS**

Obtener las normas preliminares para los macro y micronutrientes mediante la técnica de diagnóstico nutrimental compuesto con base en el rendimiento de fruto fresco en el cultivo de chile pimiento.

Identificar la dependencia del rendimiento en chile pimiento fresco de los nutrientes y las correlaciones principales entre los nutrientes.

#### **V. HIPOTESIS**

Mediante los fundamentos teórico–matemáticos de la técnica de diagnóstico nutrimental compuesto se puede definir un valor de rendimiento que divide a la población en subpoblaciones de bajo y de alto rendimiento de fruto en el cultivo de chile pimiento, lo cual permite identificar normas nutrimentales asociadas a un determinado rendimiento.

Como cualquier cultivo, en chile pimiento producido en invernadero, los nutrientes y el rendimiento presentan correlaciones significativas.

## **VI. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **6.1. Ubicación del estudio**

El estudio se estableció en los invernaderos de Edafología, específicamente en los del área de Nutrición Vegetal, del Colegio de Postgraduados, ubicado en el Km. 35.5, Carretera México–Texcoco, 56230 Montecillos, Texcoco, México, el cual se encuentra a una latitud de 19° 29′ norte, longitud 98° 54′ oeste y una altitud de 2250 msnm.

### **6.2. Condiciones experimentales**

Se tuvo un solo factor, siendo éste la solución nutritiva de Steiner, con tres diferentes niveles de concentración: 50, 100 y 150%. El diseño experimental fue un arreglo en bloques completos aleatorizados con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental constó de 12 plantas. Pero con el objetivo de obtención de las normas se muestrearon y analizaron cada una de las plantas de forma individual.

Dentro del invernadero, las temperaturas máxima y mínima diaria fueron 31.2 y 2.9 °C, respectivamente; mientras que las humedades relativa máxima y mínima diaria fueron 91.8 y 19.7%, respectivamente.

### **6.3. Establecimiento del experimento**

El material genético que se utilizó fue un híbrido comercial de la especie *Capsicum annuum* variedad Triple 4, de la casa productora Enza-Zaden. Dicho material genético es ampliamente adaptable a condiciones de invernadero; la planta es compacta y vigorosa con altos rendimientos; sus frutos se caracterizan por tener cuatro lóbulos, tamaño uniforme y maduración a color rojo.

Las semillas de pimiento se germinaron en charolas de 128 cavidades, utilizando una mezcla de turba y vermiculita como sustrato para la geminación. Las plántulas crecieron durante 40 días, después fueron seleccionadas las mejores 144 plántulas para llevarlas a transplante. Se utilizó como sustrato tezontle desinfectado con hipoclorito de sodio (1%), como contenedor se usaron bolsas de 40 x 40 cm distribuidas en doble hilera con una distancia entre bolsas de 0.4 m y con 18 plantas por hilera. Se establecieron 8 hileras dando un total de 144 plantas. Entre cada dos hileras se colocó una línea de riego. La distancia entre líneas de riego fue de 1.2 m. El sistema de riego se diseñó para suministrar 2 L por día por planta, distribuidos en ocho eventos de cinco minutos cada uno, durante el mismo.

Durante el crecimiento de las plantas se presentaron problemas de plagas principalmente mosquita blanca y trips para lo cual se hicieron aplicaciones de insecticidas como el Overón a razón de 1 ml L<sup>-1</sup>, Plenum a 0.5 g L<sup>-1</sup> y Ambush a 1 ml L<sup>-1</sup>. También se presentaron problemas de Cenicilla para la cual se aplicaron aplicaciones periódicas de Fungicidas como Manzeb a 5.5 g L<sup>-1</sup> y Sulfocop-f a 1 ml L<sup>-1</sup>.

#### **6.4. Solución nutritiva**

La solución nutritiva universal de Steiner (1984) se aplicó desde el momento del trasplante de plántulas de pimiento, en concentraciones del 50, 100 y 150%. La composición química de dicha solución al 100%, así como las fuentes fertilizantes, se muestran en los Cuadros 3 y 4. La solución nutritiva se acidificó con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1N, para mantener el pH dentro del rango de 5.5 a 6.5. Así mismo se preparó cada cuatro días para asegurar la concentración de la misma.

#### **6.5. Muestreo de tejido vegetal y análisis**

Las muestras foliares se colectaron durante la etapa de floración. Se colectaron de dos a tres hojas de las más recientemente maduras de cada planta el procedimiento se hizo como lo indican Jones *et al.* (1991). Cada muestra se limpió con agua destilada y se deshidrató hasta peso constante para posteriormente ser molida y analizada.

En el caso del N, la digestión del material se realizó con una mezcla de ácido perclórico y salicílico y se determinó por el método de Kjeldahl (Bremner, 1965). Para la determinación de fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, cobre y manganeso la muestra se sometió a una digestión húmeda con una mezcla de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> y HClO<sub>4</sub> (Jones *et al.*, 1991). Y se determinaron mediante espectrofotometría AES-ICP en un equipo Varian, Liberty II (Alcántar y Sandoval, 1999).

La cosecha se realizó en tres cortes de fruto fresco, esto para evaluar el rendimiento de cada planta en gramo de fruto fresco cosechado. Los cortes se hicieron entre los primeros 150 días de establecido el experimento. El rendimiento total (la suma de los tres cortes) de cada planta se relacionó con las concentraciones de nutrimentos para estimar las normas preliminares con el método de Diagnóstico Nutricional Compuesto. Se consideran normas preliminares porque para la obtención de una norma como tal se debe de ampliar la base de datos, realizando experimento en varias localidades y uniformizando el manejo agronómico en dichos estudios.

**Cuadro 3. Fuente y concentración de los macronutrientes en la solución Steiner.**

Fuente	Concentración (me L <sup>-1</sup> )
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O	9
KNO <sub>3</sub>	3
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3
MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	4
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1

**Cuadro 4. Fuente y concentración de los micronutrientes en la solución Steiner**

<b>Fuente</b>	<b>Concentración (ppm)</b>
FeSO <sub>4</sub>	3
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.5
MnCl <sub>2</sub> 4H <sub>2</sub> O	0.5
ZnSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	0.05
CuSO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O	0.045
H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O	0.011

## 6.6. Estimación de las normas preliminares

Las normas nutrimentales DNC se estimaron a partir del procedimiento teórico–matemático descrito por Khiari *et al.* (2001a), García *et al.* (2004; 2005; 2006), Magallanes *et al.* (2005; 2006) y Blanco *et al.* (2006), así como se describe enseguida.

Se considera que la composición del tejido vegetal forma un arreglo  $d$  dimensional ( $S^d$ ) de nutrimentos, es decir, el tejido está compuesto de  $d$  nutrimentos y un valor o nutrimento de relleno que representa los nutrimentos no determinados químicamente:

$$S^d = [(N, P, K, \dots, R_d): N>0, P>0, K>0, \dots, R_d>0, N + P + K + \dots + R_d = 100], \quad (1)$$

donde 100 es la cantidad de materia seca (%); N, P, K,... son las proporciones de nutrimentos y  $R_d$  es el nutrimento de relleno cuyo valor es dado por la diferencia entre 100% y la suma de las  $d$  proporciones de nutrimentos estimado mediante:

$$R_d = 100 - (N + P + K + \dots). \quad (2)$$

Esas proporciones se hicieron invariantes en escala después de que se dividieron por la media geométrica, G:

$$G = [N \times P \times K \times \dots \times R_d]^{1/d+1}. \quad (3)$$

Posteriormente, se determinaron los logaritmos naturales de las proporciones centradas para cada observación:

$$V_N = \ln\left(\frac{N}{G}\right), V_P = \ln\left(\frac{P}{G}\right), V_K = \ln\left(\frac{K}{G}\right), \dots, V_{R_d} = \ln\left(\frac{R_d}{G}\right). \quad (4)$$

De manera que

$$V_N + V_P + V_K + V_{Ca} + V_{Mg} + \dots + V_{R_d} = 0, \quad (5)$$

donde  $V_X$  es la expresión del logaritmo natural de la proporción centrada para el nutrimento X. Ésta operación permitió asegurar que las estimaciones se hicieron correctamente. Estas expresiones son proporciones múltiples, pues involucran a todos los nutrimentos considerados y el complemento o relleno es considerado como tal.



Por definición, la suma de los componentes (nutrimentos) de un tejido es 100% (Ecuación 1) y la suma de los logaritmos de las proporciones centradas de los  $d$  nutrientes y del relleno  $R_d$  debe ser cero, (Ecuación 5).

### **6.7. Selección de la subpoblación de alto rendimiento**

En cualquier muestra o población es deseable maximizar el número de casos que inequívocamente sean de la subpoblación de bajo rendimiento o insana (Walworth y Sumner, 1987). Se ha demostrado ampliamente que conforme el rendimiento es mayor, el rango de valores de proporciones bivariadas entre nutrientes es menor (Walworth y Sumner, 1987). Entonces, teóricamente una separación entre rendimientos altos y bajos debe determinarse por funciones de proporción de varianza para índices nutrimentales, siguiendo un orden decreciente de rendimiento. De esta manera, la relación curvilínea entre el nutriente y el rendimiento deberá mostrar un valor de referencia entre las subpoblaciones de rendimientos bajos y altos, en un punto donde las dos subpoblaciones cambian su concavidad, es decir, que exista un cambio en la pendiente de la grafica o halla un punto de inflexión. La primera derivada de la función de proporción de la varianza acumulada disminuye abajo del punto de inflexión y se incrementa sobre él. Es claro pues que la discriminación entre las subpoblaciones se mejora sobre dicho punto. El valor de rendimiento de referencia en el punto de inflexión es el rendimiento mínimo para separar a las dos subpoblaciones.

Para estimar el punto de inflexión se siguieron los siguientes pasos:

- a) Se ordenaron las observaciones considerando el rendimiento en orden decreciente. Cada observación consiste de las concentraciones de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn (expresadas en % con base a materia seca) y rendimiento ( $\text{g fruto planta}^{-1}$ ) provenientes del experimento.
- b) Se estimaron los logaritmos naturales de las proporciones centradas de las proporciones de los nutrientes usando las Ecuaciones 2, 3 y 4.
- c) Se usó el procedimiento iterativo de Cate–Nelson para dividir la población, partiendo de que la primera subpoblación de altos rendimientos consistirá de las dos primeras observaciones y las restantes conformarán la de bajo rendimiento; después, las tres primeras se considerarán de rendimiento alto y el resto de rendimiento bajo. El procedimiento se repitió hasta que las dos observaciones de menor rendimiento formaron un grupo y el resto el otro.

**d)** Para cada subpoblación obtenida según el paso anterior se estimó la varianza de los  $V_X$ . Ello permitió estimar la proporción de varianza para el componente X,  $f_i(V_X)$ :

$$f_i(V_X) = \frac{\text{Varianza de } V_X \text{ } n_1 \text{ observaciones}}{\text{Varianza de } V_X \text{ } n_2 \text{ observaciones}}, \quad (6)$$

donde  $f_i(V_X)$  es la función de proporción entre las dos subpoblaciones en la  $i$ ésima iteración ( $i = n_1-1$ ) y  $V_X$  es la expresión del logaritmo natural de la proporción centrada DNC para el nutrimento X.

**e)** La función de proporción de varianza acumulada se estimó al considerar que es la suma de las proporciones de varianza en la  $i$ ésima iteración desde el principio. La función de proporción de varianza acumulada para una iteración dada se estimó como la proporción de la suma total de proporciones de varianza de todas las iteraciones para comparar la fuerza discriminatoria de los  $V_X$  entre bajos y altos rendimientos sobre una escala común. La función de proporción de varianza acumulada se estimó con la siguiente fórmula:

$$F_i^C(V_X) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_1-1} f_i(V_X)}{\sum_{i=1}^{n_1-3} f_i(V_X)} \right] [100], \quad (7)$$

donde  $n_1-1$  es el número de partición y  $n$  es el número total de observaciones ( $n_1 + n_2$ ). El denominador es la suma de proporciones de todas las iteraciones y, por lo tanto, es una constante para el componente X.

**f)** Entonces, cada función de proporción de varianza acumulada  $F_i^C(V_X)$  se relacionó con el rendimiento Y mediante un patrón cúbico:

$$F_i^C(V_X) = aY^3 + bY^2 + cY + d. \quad (8)$$

**g)** Dado que el punto de inflexión es aquel donde el modelo muestra un cambio en concavidad, se estimó al obtener la segunda derivada de la Ecuación 8:

$$\frac{\partial F_i^C(V_X)}{\partial Y} = 3aY^2 + 2bY + C, \quad (9)$$

$$\frac{\partial^2 F_i^C(V_x)}{\partial Y^2} = 6aY + 2b. \quad (10)$$

Al igualar a cero se obtuvieron los valores de los puntos de inflexión ( $-b/3a$ ):

$$Y = -b/3a \quad (11)$$

El valor límite de rendimiento mayor de todas las expresiones de los nutrientes fue seleccionado para dividir a la población en subpoblaciones de alto y bajo rendimiento para asegurar que el rendimiento mínimo asociado a una subpoblación de alto rendimiento sea clasificado como un rendimiento alto para cualquier expresión nutrimental.

### **6.8. Interacciones nutrimentales**

Para la identificación de las interacciones entre los nutrientes analizados en el tejido vegetal y su relación con el rendimiento del cultivo en peso fresco de fruto se estimaron coeficientes de correlación de Pearson. Este coeficiente varía de  $-1$  a  $+1$ , de manera que valores positivos significativos sugieren relaciones sinérgicas (sinergismos), mientras que valores negativos significativos implican relaciones inversas (antagonismos), cuando se analiza la relación entre pares de nutrientes; mientras que cuando se relaciona algún nutriente con el rendimiento, es posible evidenciar dependencia de éste con respecto al nutriente del caso.

Para la generación de las normas preliminares se utilizó el programa Microsoft Excel 2007 Software (Microsoft Corp., 2007), mientras que para el cálculo de los coeficientes de Pearson se usó el paquete Statistica, versión 6 (StatSoft Inc., 2004).

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1. Estadísticas descriptivas del rendimiento

Los estimadores estadísticos descriptivos de las variables rendimiento y concentraciones nutrimentales se presentan en el Cuadro 5. Las medias de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn fueron 45.52, 4.45, 48.51, 20.37, 6.77, 0.09, 0.01 y 0.18 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, mientras que la de rendimiento fue de 969 g PI<sup>-1</sup>. Todas las variables presentaron una variabilidad relativa grande (CV > 25%), excepto la concentración de N (CV = 13.28%). Por consiguiente, la base de datos puede ser usada para generar normas nutrimentales (Blanco *et al.*, 2010).

### 7.2. Normas de diagnóstico nutrimental compuesto

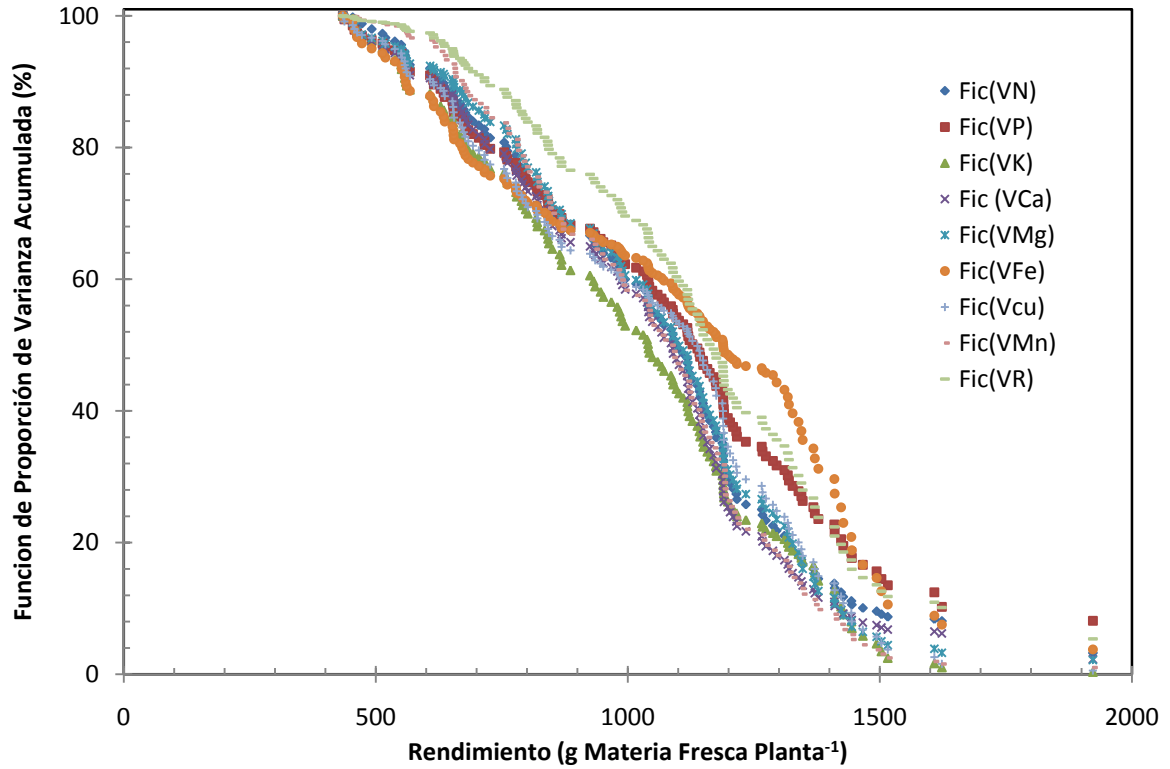
Los nueve modelos experimentales (Figura 1), entre cada función de proporción de varianza acumulada  $[F_i^C(V_N), F_i^C(V_P), F_i^C(V_K), F_i^C(V_{Ca}), F_i^C(V_{Mg}), F_i^C(V_{Fe}), F_i^C(V_{Cu}), F_i^C(V_{Mn})$  y  $F_i^C(V_R)]$  y el rendimiento, se ajustaron bien a modelos cúbicos, como se muestra en el Cuadro 6 mediante el coeficiente de determinación ( $R^2 > 0.97$ ). Los rendimientos asociados a los puntos de inflexión fueron 1250, 1333.33, 1111.11, 1111.11, 1111.11, 2222.22, 1111.11, 1000 y 1111.11 (g PI<sup>-1</sup>) para N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn, respectivamente (Cuadro 6). Los índices globales de desbalance nutrimental (DNC  $r^2$ ) se ajustan bien a una distribución acumulada de  $\chi^2$  (Figura 2) (Magallanes *et al.*, 2006); entonces, como la teoría del método indica, es recomendable considerar al valor de rendimiento mayor para ser usado como referencia con el fin de separar a las observaciones en dos subpoblaciones, una de alto y otra de bajo rendimiento. En el presente caso, el valor crítico que se decidió tomar como rendimiento de referencia fue 1333.33 (g PI<sup>-1</sup>), asociado al punto de inflexión del modelo cúbico ajustado correspondiente al P.

Al elegir 1333.33 (g PI<sup>-1</sup>) como el rendimiento de referencia, la subpoblación de alto rendimiento consta de 19 observaciones que equivalen al 13.2% de la población, mientras que la subpoblación de bajo rendimiento contempla a 125 observaciones que corresponden al 86.8% de la población.

Las normas preliminares de DNC expresadas como medias y desviaciones estándar de las proporciones de varianza ( $V_X^*$  y  $SD_X^*$ , respectivamente) en el cultivo de chile pimiento, así como los rangos de concentración nutrimental óptima para cada elemento se aprecian en el Cuadro 7.

**Cuadro 5. Estimadores estadísticos descriptivos de las variables rendimiento y concentraciones nutrimentales en tejido vegetal de pimiento (n = 144).**

<b>Variable</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>CV</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
Rendimiento (g PI <sup>-1</sup> )	969.02	319.99	33.02	177.80	1922.66
N (g kg <sup>-1</sup> )	45.52	6.04	13.28	20.62	87.65
P (g kg <sup>-1</sup> )	4.45	1.43	32.04	1.82	10.50
K (g kg <sup>-1</sup> )	48.51	13.52	27.89	19.39	84.11
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	20.37	5.81	28.53	8.20	35.16
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	6.77	1.86	27.38	2.73	11.99
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	0.09	0.02	25.74	0.05	0.17
Cu (g kg <sup>-1</sup> )	0.01	0.01	48.62	0.01	0.06
Mn (g kg <sup>-1</sup> )	0.18	0.06	31.92	0.06	0.41



**Figura 1. Relaciones cúbicas experimentales entre el rendimiento de pimiento, y las funciones de proporción de varianza acumulada en el arreglo  $S^8$  para estimar el punto de inflexión y el rendimiento crítico para separar a las sub-poblaciones de alto y bajo rendimiento.**

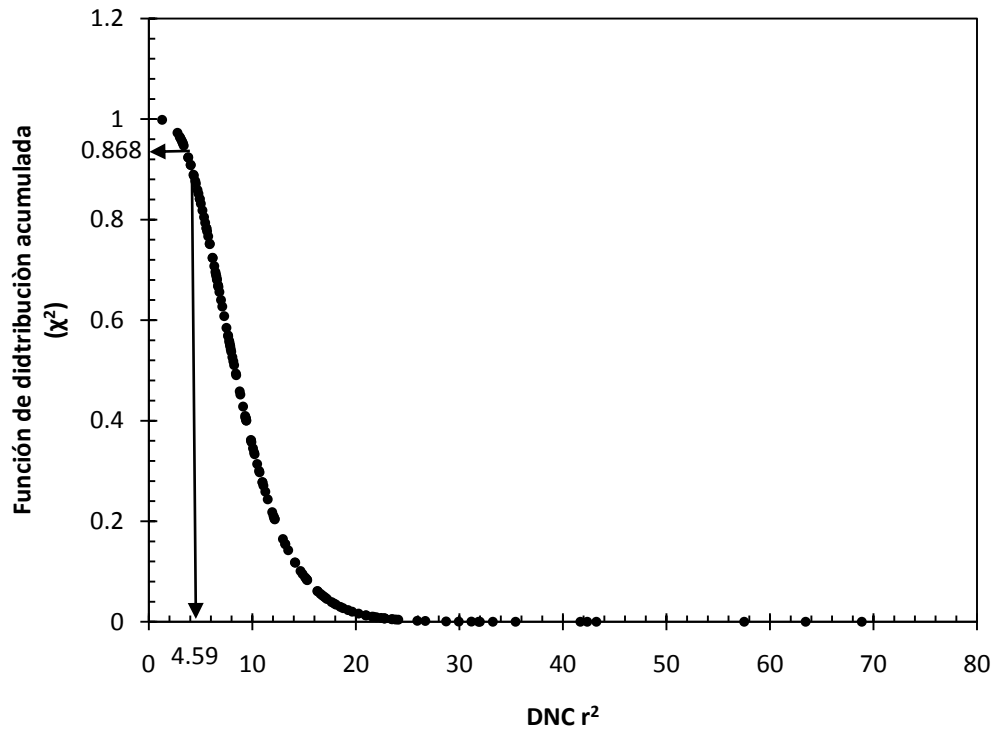
**Cuadro 6. Modelos cúbicos y rendimiento en los puntos de inflexión ( $-b/3a$ ) para cada función asociada a la proporción de logaritmos centrados en la población analizada (n=144).**

Nutrimento	$F_i^C(V_X) = aY^3 + bY^2 + cY + d$	$R^2$	Rendimiento (g $PI^{-1}$ ) en el punto de inflexión ( $-b/3a$ )
N	$F_i^C(V_N) = 0.00000008Y^3 - 0.0003Y^2 + 0.1771Y + 64.685$	0.9905	1250.00
P	$F_i^C(V_P) = 0.00000005Y^3 - 0.0002Y^2 + 0.1023Y + 81.46$	0.9923	<b>1333.33</b>
K	$F_i^C(V_K) = 0.00000006Y^3 - 0.0002Y^2 + 0.0874Y + 90.601$	0.9956	1111.11
Ca	$F_i^C(V_{Ca}) = 0.00000009Y^3 - 0.0003Y^2 + 0.1943Y + 59.535$	0.9876	1111.11
Mg	$F_i^C(V_{Mg}) = 0.00000009Y^3 - 0.0003Y^2 + 0.2296Y + 47.929$	0.9938	1111.11
Fe	$F_i^C(V_{Fe}) = 0.00000003Y^3 - 0.00002Y^2 + 0.032Y + 113.91$	0.971	2222.22
Cu	$F_i^C(V_{Cu}) = 0.00000006Y^3 - 0.0002Y^2 + 0.1126Y + 78.372$	0.9804	1111.11
Mn	$F_i^C(V_{Mn}) = 0.0000001Y^3 - 0.0003Y^2 + 0.2318Y + 53.424$	0.9939	1000.00
R	$F_i^C(V_R) = 0.00000009Y^3 - 0.0003Y^2 + 0.24Y + 43.13$	0.9943	1111.11

**Cuadro 7. Normas preliminares (Media y Desviación estándar, DE de las  $V_X^*$ ) de diagnóstico nutrimental compuesto (DNC) para  $d = 8$  nutrimentos y rangos de concentración óptimos (concentración media y desviación estándar, DE) en pimiento con un rendimiento de referencia de  $1333.33 \text{ g PI}^{-1}$ .**

<b>Proporciones logarítmicas centradas</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Nutrimento</b>	<b>Media (g Kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>DE (g Kg<sup>-1</sup>)</b>
$V_N^*$	2.51	0.17	N	45.88	6.64
$V_P^*$	0.09	0.14	P	4.16	0.96
$V_K^*$	2.57	0.25	K	49.69	12.20
$V_{Ca}^*$	1.66	0.16	Ca	19.98	4.65
$V_{Mg}^*$	0.56	0.13	Mg	6.59	1.21
$V_{Fe}^*$	-3.76	0.11	Fe	0.09	0.01
$V_{Cu}^*$	-5.96	0.25	Cu	0.01	0.003
$V_{Mn}^*$	-3.13	0.14	Mn	0.16	0.04
$V_{R_s}^*$	5.46	0.12	R	873.44	16.86
<b>Suma</b>	<b>0</b>				





**Figura 2.** Función de distribución acumulada de  $\chi^2$  con nueve grados de libertad para obtener el valor crítico teórico de  $DNC r^2$  en el arreglo S8 asociado al 86.8% de la población (subpoblación de bajo rendimiento).

Al comparar los rangos de suficiencia reportados para otras especies (Cuadro 2) con los rangos nutrimentales (Media  $\pm$  Desviación estándar), asociadas a las normas nutrimentales resultantes del presente trabajo para chile pimiento, se aprecia que los correspondientes al N en los casos maíz, manzano y naranjo son menores que los de chile pimiento producido en invernadero con solución nutritiva; mientras que para K, remolacha y tomate son similares y para Mg y Mn son menores (excepto maíz). En el caso del P, los rangos de trigo, maíz, remolacha, algodón, tomate y alfalfa son iguales o se traslapan, pero los de chile pimiento son mayores que los de manzano y naranjo, ello puede deberse a que éstos últimos son árboles. En lo concerniente a Ca, los rangos de chile pimiento son mayores que los de tomate y naranjo, menores que los de trigo, maíz, remolacha y algodón, e iguales que los de alfalfa y manzano. En lo que respecta a Cu, los rangos de chile pimiento son iguales que los de trigo, remolacha, tomate, alfalfa, manzano y naranjo, pero mayores a los de maíz y algodón.

Concentraciones óptimas para macronutrientes en *Capsicum annuum* (Cuadro 8) en floración (Hochmuth, 1997) y en primera fructificación (Piggot, 1986) han sido reportadas. Desafortunadamente, esas concentraciones no se asociaron a un rendimiento de referencia. Asimismo, García *et al.* (2007) y Valdez *et al.* (2005) generaron normas nutrimentales DNC para *Capsicum frutescens* (chiltepín) y *Capsicum annuum* tipo mirasol (seco), respectivamente, y acotaron concentraciones nutrimentales óptimas (Cuadro 8). Los rendimientos de referencia asociados a dichas normas fueron 1.39 t ha<sup>-1</sup> para chile chiltepín y 3.82 t ha<sup>-1</sup> para chile mirasol seco. Al comparar esa información con los rangos nutrimentales (Media  $\pm$  1 Desviación estándar), asociadas a las normas nutrimentales resultantes del presente trabajo, se aprecia una discrepancia para el caso del N, pues la concentración señalada por Hochmuth (1997), fue la más parecida a la encontrada; mientras que las concentraciones reportadas por Piggot (1986), García *et al.* (2007) y Valdez *et al.* (2005) tienen más variación, ello puede deberse a que las reportadas por estos últimos tres investigadores se derivaron de parcelas en campo y las otras en invernadero con soluciones nutritivas. En el caso del rango de P hay coincidencia total con lo reportado por Hochmuth (1997), Piggot (1986) y García *et al.* (2007), y parcial con lo señalado por Valdez *et al.* (2005). En los casos de K, Ca y Mg, los rangos previamente reportados coinciden parcialmente con el definido en la presente investigación ya que todos se traslapan.

En general, parece ser que el chile pimiento que se cultiva en invernadero con soluciones nutritivas tiende a concentrar en su tejido foliar cantidades no tan similares de nitrógeno que otros

tipos de chile cultivados en condiciones de campo, pero cantidades similares, en términos de rangos de suficiencia, de los nutrimentos P, K, Ca y Mg. Esto confirma que es importante realizar la validación de las normas de DNC propuestas para sistemas productivos en invernadero con soluciones nutritivas, en especial considerando a los ocho nutrimentos involucrados (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn).

### **7.3. Correlaciones entre nutrimentos y rendimiento**

Una correlación es el grado de asociación entre dos variables. La matriz de correlaciones (Cuadro 9) provee un panorama general del grado de dependencia del rendimiento de los nutrimentos, así como las correlaciones nutrimentales significativas ( $p \leq 0.05$ ). El rendimiento es dependiente de manera significativa ( $p \leq 0.05$ ) de la concentración del P, de manera negativa. La correlación negativa significativa entre el P y el rendimiento implica que el rendimiento disminuye conforme aumenta la concentración de P en las hojas de las plantas de chile pimiento. Además, las correlaciones nutrimentales significativas entre N y P, N y Mn, P y K, P y Ca, P y Mg, P y Fe, P y Cu, P y Mn, K y Ca, K y Mg, K y Fe, K y Mn, Ca y Mg, Ca y Fe, Ca y Cu, Ca y Mn, Mg y Fe, Mg y Cu, Mg y Mn, Fe y Cu, Fe y Mn y Cu y Mn fueron positivas; mientras que las correlaciones entre P y R, K y R, Ca y R, Mg y R, Fe y R, Cu y R y Mn y R fueron negativas, lo cual significa que conforme la concentración de uno aumenta, la del otro disminuye. Los nutrimentos N, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn no se correlacionaron de manera significativa con el rendimiento, pero es importante mantener niveles adecuados de los compuestos fotoquímicos en las hojas de las plantas de chile pimiento para asegurar que la fotosíntesis y los procesos regulatorios se lleven a cabo óptimamente. Para confirmar este supuesto otras dos matrices de correlaciones de Pearson entre el rendimiento y los nutrimentos se realizaron: una al considerar las observaciones de altos rendimientos y la otra con la de bajos rendimientos.

En la matriz de correlaciones elaborada con las observaciones de alto rendimiento (Cuadro 10) se aprecia que el rendimiento no dependió de manera significativa ( $p \leq 0.05$ ) de ninguna concentración nutrimental. Las correlaciones nutrimentales significativas entre P y Ca, P y Mg, P y Mn, K y Ca, Ca y Mg, Ca y Mn, Mg y Mn y Fe y Cu fueron positivas, mientras que las correlaciones entre N y Mg, P y R, K y R, Ca y R y Mn y R fueron negativas.

En la matriz de correlaciones para las observaciones de bajo rendimiento (Cuadro 11) se aprecia que el rendimiento fue dependiente de manera significativa ( $p \leq 0.05$ ) de las concentraciones de N

( $r = -0.23$ ) y P ( $r = -0.218$ ). Las correlaciones nutrimentales significativas entre N y P, N y Mn, P y K, P y Ca, P y Mg, P y Fe, P y Cu, P y Mn, K y Ca, K y Mg, K y Fe, K y Mn, Ca y Mg, Ca y Fe, Ca y Cu, Ca y Mn, Mg y Fe, Mg y Cu, Mg y Mn, Fe y Cu, Fe y Mn, y Cu y Mn fueron positivas. Por otra parte, las correlaciones entre P y R, K y R, Ca y R, Mg y R, Fe y R, Cu y R, y Mn y R fueron significativamente negativas.

Merece remarcar que en la matriz de correlaciones con todas las observaciones y en la correspondiente a bajos rendimientos, la correlación significativa negativa entre P y rendimientos se evidenció. Ello sugiere que el P limitó el rendimiento de las plantas consideradas como unidades experimentales, lo cual puede interpretarse como insuficiencia de dicho nutrimento, en especial en la subpoblación de bajos rendimientos. Sin embargo, lo más probable es que el N haya sido el nutrimento más limitante del rendimiento, ya que esto se evidenció mediante una correlación negativa significativa entre él y el rendimiento al considerar las observaciones de bajo rendimiento, lo cual se confirmó con la correlación positiva significativa entre N y P. Esto confirma lo previamente señalado en el contexto de que los rangos asociados a las normas nutrimentales aquí propuestas se asocian a rangos de suficiencia (de N) diferentes a los reportados para otras especies, e inclusive, otros tipos de Chile.

El que las correlaciones nutrimentales significativas positivas entre N y P, N y Mn, P y K, P y Fe, P y Cu, K y Mg, K y Fe, K y Mn, Ca y Fe, Ca y Cu, Mg y Fe, Mg y Cu, Fe y Mn, y Cu y Mn hayan sido evidenciadas solo para la subpoblación de bajos rendimientos sugiere que aún es posible obtener una respuesta en rendimiento con el incremento de la concentración del par de elementos involucrado. Sin embargo, este supuesto debe tomarse con cautela, en especial los casos de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn porque se correlacionaron negativamente de manera significativa y negativamente con el nutrimento de relleno (R) y, además, los rangos de suficiencia de los nutrimentos P, K, Ca y Mg asociados a las normas propuestas son similares a los de otras especies y tipos de Chile.

**Cuadro 8. Concentraciones nutrimentales óptimas citadas en la literatura para especies del género *Capsicum*.**

<b>Nutrimento</b>	<b>Hochmuth (1997)</b>	<b>Piggot (1986)</b>	<b>García <i>et al.</i> (2007)</b>	<b>Valdez <i>et al.</i> (2005)</b>
N (g Kg <sup>-1</sup> )	40 – 50	29 – 46	47 – 59	30 – 43
P (g Kg <sup>-1</sup> )	3 – 5	3 – 5	0.1 – 6	4 – 9
K (g Kg <sup>-1</sup> )	25 – 50	26 – 55	54 – 64	47 – 59
Ca (g Kg <sup>-1</sup> )	9 – 15	13 – 37	23 – 30	9 – 16
Mg (g Kg <sup>-1</sup> )	3 – 6	3 – 12	7 – 9	6 – 9

**Cuadro 9. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre rendimiento y concentración de nutrimentos en tejido vegetal de pimiento con la población completa.**

Variable	Rendimiento (g planta <sup>-1</sup> )	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	K (g kg <sup>-1</sup> )	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	Fe (g kg <sup>-1</sup> )	Cu (g kg <sup>-1</sup> )	Mn (g kg <sup>-1</sup> )
N (g kg <sup>-1</sup> )	-0.141 p=0.093								
P (g kg <sup>-1</sup> )	<b>-0.210</b> <b>p=0.012</b>	<b>0.246</b> <b>p=0.003</b>							
K (g kg <sup>-1</sup> )	-0.038 p=0.648	-0.078 p=0.352	<b>0.572</b> <b>p≤0.0001</b>						
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	-0.085 p=0.314	-0.073 p=0.388	<b>0.744</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.702</b> <b>p≤0.0001</b>					
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	-0.048 p=0.566	-0.105 p=0.210	<b>0.693</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.595</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.874</b> <b>p≤0.001</b>				
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	-0.008 p=0.921	0.099 p=0.239	<b>0.677</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.481</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.650</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.592</b> <b>p≤0.0001</b>			
Cu (g kg <sup>-1</sup> )	-0.007 p=0.937	-0.003 p=0.969	<b>0.302</b> <b>p≤0.0001</b>	0.122 p=0.145	<b>0.300</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.244</b> <b>p≤0.003</b>	<b>0.401</b> <b>p≤0.0001</b>		
Mn (g kg <sup>-1</sup> )	-0.147 p=0.078	<b>0.194</b> <b>p=0.020</b>	<b>0.806</b> <b>p≤0.001</b>	<b>0.515</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.772</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.740</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.636</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>0.251</b> <b>p≤0.002</b>	
R (g kg <sup>-1</sup> )	0.085 p=0.310	-0.054 p=0.520	<b>-0.752</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>-0.944</b> <b>p≤0.001</b>	<b>-0.871</b> <b>p≤0.001</b>	<b>-0.769</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>-0.616</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>-0.209</b> <b>p=0.012</b>	<b>-0.707</b> <b>p≤0.0001</b>

Coeficientes de correlación de Pearson (r) significativos a p<0.05 en negritas.

**Cuadro 10. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre rendimiento y concentración de nutrimentos en tejido vegetal de pimiento, en la subpoblación de altos rendimientos.**

Variable	Rendimiento	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn
	(g planta <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )
<b>N (g kg<sup>-1</sup>)</b>	0.177 p=0.468								
<b>P (g kg<sup>-1</sup>)</b>	0.095 p=0.698	0.277 p=0.251							
<b>K (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-0.007 p=0.977	-0.107 p=0.662	0.210 p=0.388						
<b>Ca (g kg<sup>-1</sup>)</b>	0.046 p=0.851	-0.120 p=0.624	<b>0.664</b> <b>p=0.002</b>	<b>0.594</b> <b>p=0.007</b>					
<b>Mg (g kg<sup>-1</sup>)</b>	0.287 p=0.234	<b>-0.523</b> <b>p=0.021</b>	<b>0.532</b> <b>p=0.019</b>	0.285 p=0.237	<b>0.739</b> <b>p≤0.0001</b>				
<b>Fe (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-0.292 p=0.226	-0.240 p=0.322	0.356 p=0.135	0.013 p=-0.957	0.342 p=0.152	0.332 p=0.165			
<b>Cu (g kg<sup>-1</sup>)</b>	0.107 p=0.662	-0.071 p=0.774	0.315 p=0.188	-0.443 p=0.058	0.015 p=0.952	0.208 p=0.392	<b>0.520</b> <b>p=0.023</b>		
<b>Mn (g kg<sup>-1</sup>)</b>	0.251 p=0.300	0.076 p=0.757	<b>0.612</b> <b>p=0.005</b>	0.334 p=0.163	<b>0.653</b> <b>p=0.002</b>	<b>0.468</b> <b>p=0.043</b>	0.207 p=0.396	0.186 p=0.447	
<b>R (g kg<sup>-1</sup>)</b>	-0.064 p=0.794	-0.026 p=0.916	<b>-0.493</b> <b>p=0.032</b>	<b>-0.936</b> <b>p≤0.0001</b>	<b>-0.807</b> <b>p≤0.0001</b>	-0.447 p=0.055	-0.115 p=0.638	0.304 p=0.206	<b>-0.522</b> <b>p=0.022</b>

Coeficientes de correlación de Pearson (r) significativos a p<0.05 en negritas.

**Cuadro 11. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre rendimiento y concentración de nutrientes en tejido vegetal de pimiento, en la subpoblación de bajos rendimientos.**

Variable	Rendimiento (g planta <sup>-1</sup> )	N (g kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	K (g kg <sup>-1</sup> )	Ca (g kg <sup>-1</sup> )	Mg (g kg <sup>-1</sup> )	Fe (g kg <sup>-1</sup> )	Cu (g kg <sup>-1</sup> )	Mn (g kg <sup>-1</sup> )
N (g kg <sup>-1</sup> )	<b>-0.230</b> p=0.010								
P (g kg <sup>-1</sup> )	<b>-0.218</b> p=0.015	<b>0.249</b> p=0.005							
K (g kg <sup>-1</sup> )	-0.079 p=0.378	-0.075 p=0.404	<b>0.610</b> p≤0.0001						
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	-0.094 p=0.296	-0.066 p=0.462	<b>0.751</b> p≤0.0001	<b>.715</b> p≤0.0001					
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	-0.046 p=0.609	-0.064 p=0.481	<b>0.703</b> p≤0.0001	<b>0.625</b> p≤0.0001	<b>0.885</b> p≤0.001				
Fe (g kg <sup>-1</sup> )	0.009 p=0.917	0.124 p=0.168	<b>0.693</b> p≤0.0001	<b>0.514</b> p≤0.0001	<b>0.670</b> p≤0.0001	<b>0.603</b> p≤0.0001			
Cu (g kg <sup>-1</sup> )	0.065 p=0.472	0.004 p=0.966	<b>0.297</b> p≤0.001	0.160 p=0.075	<b>0.315</b> p≤0.0001	<b>0.244</b> p=0.006	<b>0.399</b> p≤0.0001		
Mn (g kg <sup>-1</sup> )	-0.128 p=0.155	<b>0.213</b> p=0.017	<b>0.816</b> p≤0.001	<b>0.538</b> p≤0.0001	<b>0.783</b> p≤0.0001	<b>0.756</b> p≤0.0001	<b>0.655</b> p≤0.0001	<b>0.247</b> p=0.006	
R (g kg <sup>-1</sup> )	0.124 p=0.168	-0.058 p=0.523	<b>-0.775</b> p≤0.0001	<b>-0.946</b> p≤0.001	<b>-0.877</b> p≤0.001	<b>-0.793</b> p≤0.0001	<b>-0.645</b> p≤0.0001	<b>-0.238</b> p=0.008	<b>-0.726</b> p≤0.0001

Coefficientes de correlación de Pearson (r) significativos a p<0.05 en negritas.



## VIII. CONCLUSIONES

La técnica de diagnóstico nutrimental compuesto permitió definir un rendimiento de 1333.33 (g  $\text{PI}^{-1}$ ) como referencia para dividir a la población en subpoblaciones de bajo y de alto rendimiento de fruto en el cultivo de chile pimiento, lo cual permitió identificar normas nutrimentales. Las normas preliminares de diagnóstico de nutrimento compuesto, expresadas como medias y desviaciones estándar de las proporciones de varianza ( $V_x^*$  y  $SD_x^*$ , respectivamente) en el cultivo de chile pimiento, se asocian a los siguientes rangos (media  $\pm$  desviación estándar) de concentración (g  $\text{kg}^{-1}$ ): N,  $45.88 \pm 6.64$ ; P,  $4.16 \pm 0.96$ ; K,  $49.69 \pm 12.2$ ; Ca,  $19.98 \pm 4.65$ ; Mg,  $6.59 \pm 1.21$ ; Fe,  $0.09 \pm 0.01$ ; Cu,  $0.01 \pm 0.003$ ; y Mn,  $0.16 \pm 0.04$ . Con ello se confirma la primera hipótesis formulada y se logra el objetivo correspondiente.

Como en cualquier cultivo, el del chile pimiento producido en invernadero, los nutrimentos y el rendimiento presentan correlaciones significativas. El rendimiento estuvo limitado de manera significativa por el N y el P. De entre las correlaciones entre nutrimentos, la definida por N y P es determinante en la producción de chile pimiento en invernadero con soluciones nutritivas. Estos resultados confirman la segunda hipótesis y el logro del objetivo asociado.

Las plantas de chile pimiento cultivado en invernadero con soluciones nutritivas tienden a concentrar en su tejido foliar cantidades diferentes de nitrógeno que otros tipos de chile cultivados en condiciones de campo; pero cantidades similares, en términos de rangos de suficiencia, de los nutrimentos P, K, Ca y Mg. Por lo tanto, es recomendable realizar la validación de las normas de DNC propuestas para sistemas productivos en invernadero con soluciones nutritivas, en especial considerando a los ocho nutrimentos involucrados (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn).

## IX. LITERATURA CITADA

- Alcántar G., G., y Sandoval V. M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial No.10. SMCS. Chapingo, México. 150 p.
- Bates, T.E. 1971. Factor affecting critical nutrient concentrations in plant and their evaluation: A review. *Soil Sci.* 112: 116–130.
- Beverly, R. B. 1987. Modified DRIS method for simplified nutrient diagnosis of Valencia oranges. *J. Plant Nutr.* 10 (9–16): 1401–1408.
- Blanco, M. F., Lara, H. A., Valdez, C. R. D., Cortés, B. J. O., Luna, F. M., Salas, L. A. 2006. Interacciones nutrimentales y normas de la técnica de nutrimento compuesto en nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12 (2): 165–175.
- Blanco, M. F., Magallanes Q. R., Valdez, C. R. D., Vázquez A. R., Olivares S. E., Gutiérrez O. E., Vidales C. J. A. 2009. Comparison between CND norms and boundary-line approach nutrient standards *Opuntia ficus-indica* L. Case. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 15 (2): 217–223.
- Blanco, M. F., Magallanes Q. R., Valdez, C. R. D., Vázquez A. R., Olivares S. E., Gutiérrez O. E., Vidales C. J. A., Murillo A. B. 2010. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. *Journal of plant nutrition and soil science* 173: 927–934.
- Bremner, J. 1965. Methods of soil analysis. Part. 2. Black, C.A. Ed. American Soc. of Agrom. Madison, Wisconsin, USA. 1146p.
- Dow, A. I. and S. Roberts. 1982. Proposal: Critical nutrient ranges for crop diagnosis. *Agronomy Journal* 74: 401–403.

- FAO. 2011. Food and agriculture organization of the united nations. In <http://www.faostat.fao.org> (14-03-2011).
- FUMIAF. 2005. La agricultura: una opción empresarial. In: <http://www.fumiaf.org.mx/coloquio2005/principal.html> (10-03-2011).
- Gárate, A. e I. Bonilla. 2001. Nutrición mineral y producción vegetal. En: Azcón-Bieto, J. y M. Talón (Coordinadores). Fundamentos de Fisiología Vegetal. Ed. McGraw-Hill y Interamericana de España, S. A. U. y Edicions Universitat de Barcelona. Madrid, España. pp. 113–130.
- García, H. J. L., Valdez, C. R. D., Murillo, A. B., Nieto, G. A., Beltrán, L. F., Magallanes, Q. R., Troyo, D. E. 2004. Compositional nutrient diagnosis and main nutrient interactions in yellow pepper grown on desert calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 167: 509–515.
- García, H. J. L., Valdez, C. R. D., Ávila, S. N. Y., Murillo, A. B., Nieto, G. A., Magallanes, Q. R., Larrinaga, J., Troyo, D. E. 2005. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms for cowpea (*Vigna unguiculata* (L) Walp) grown on desert calcareous soil. *Plant and Soil* 217 (1–2): 297–307.
- García, H. J. L., Valdez, C. R. D., Murillo, A. B., Beltrán, F. A., Ruiz, F. H., Orona, C. I., Flores, A., Troyo, D. E. 2006. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms in *Aloe vera* L. grown on calcareous soil in an arid environment. *Environmental and Experimental Botany* 58 (1–3): 244–252.
- García, H. J. L., Valdez, C. R. D., Servín V. R., Troyo, D. E., Murillo, A. B., Rueda P. E. O., Rodríguez O. J. C., Magallanes Q. R. 2007 Interacciones nutrimentales y normas de diagnostico de nutrimento compuesto en una variedad semidomesticada de *Capsicum frutescens*. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 13 (2): 133–140.

- García, H. J. L., Orona C. I., González C. G., Valdez, C. R. D., Murillo A. B., Troyo D. E., Fortis H. M., Segura C. M. A. 2009. Interacciones nutrimentales y normas de diagnóstico de nutrimento compuesto en nogal pecanero (*Carya illinoensis*). Revista Chapingo Serie Horticultura 15 (2): 141–147.
- Hochmuth, G. J. 1997. Pepper production guide for Florida. Commercial Vegetable Guide Series. Florida Cooperative Extension Service. Institute of Food and Agricultural Sciences. University of Florida.
- Jones, C. A. 1981. Proposed modifications of the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for interpreting plant analysis. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 12 (8): 785–794.
- Jones, J. B. Jr; B. Wolf and A. Mills, H. 1991. Plant Analysis Handbook. Methods of Plant Analysis and Interpretation. Micro–Macro Publishing Athens, GA, USA.
- Kenworthy, A. L. 1961. Interpreting the balance of nutrient element in leaves of fruit trees. In: Walter Reuter (ed) Plant Analysis and Fertilizer Problems. Publication No. 8. American Institute of Biological Science. Washington D. C.
- Kenworthy, A. L. 1967. Plant analysis and interpretation of analysis for horticulture crops. In: Soil Testing and Plant Analysis. Part II SSSA Madison Wisconsin, USA.
- Khiari, L.; Parent, L. E.; Tremblay, N. 2001a. Selecting the high–yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. Agronomy Journal 93: 802–808.
- Khiari, L.; Parent, L. E.; Tremblay, N. 2001b. The phosphorus Compositional Nutrient Diagnosis Range for Potato. Agronomy Journal 93: 815–819.

- Long, S. J., Álvarez, M., y Camarena, A. 1998. El placer del chile. Editorial Clío, libros y videos, S.A. de C.V. México D.F. 93 p.
- Lucena, J. J. 1997. Methods of Diagnosis of Mineral Nutrition of Plants a Critical Review. Acta Hort. (ISHS) 448: 179–192
- Magallanes Q. R., Valdez C. R. D., Pérez V. O., Blanco M. F., Murillo A. B., Márquez M. M., R. Ruiz G. R. y García H. J. L. 2003. Normas preliminares de diagnóstico nutricional en *Opuntia ficus-indica*. In: Esparza, O., M. A. Salas, J. Mena y R. D. Valdez (Eds.). 2003. Memoria IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional Sobre Conocimiento y Aprovechamiento de Nopal. Zacatecas, Zac., México. pp. 293–297.
- Magallanes Q. R., Valdez C. R. D., Blanco M. F., B. Murillo, Márquez M. M., Ruiz G. R., Pérez V. O., García H. J. L., Murillo A. B., López M. J. D. y Martínez R. C. E. 2005. Compositional nutrient diagnosis in nopal (*Opuntia ficus-indica*). Journal of the Professional Association for Cactus Development 6: 78–89.
- Magallanes Q. R., Valdez C. R. D., Olivares, S. E., Pérez, V. O., García, H. J. L., Martínez, J. D. 2006. Compositional nutrient diagnosis in maize grown in calcareous soil. Journal of Plant Nutrition 29: 2019–2033.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition in Higher Plants, 2.<sup>a</sup> ed. American Press. Londres.
- Microsoft Corp., 2007. Microsoft Excel 2007 (Computer Program Manual). Troy, NY, USA.
- Parent, L. E., M. Poirier, M. Asselin. 1995. Multinutrient diagnosis of nitrogen status in Plants. Journal of Plant Nutrition 18(5): 1013–1025.
- Parent, L. E. and M. Dafir. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. J. Am. Soc. Hort. Sci. 117: 239–242.

- Parent, L. E., D. Isfan, N. Tremblay and A. Karam. 1994. Multivariate nutrient diagnosis of the carrot crop. *J. Am. Soc. Hort–Sci.* 119(3): 420–426.
- Piggot T. J. 1986. Vegetable crops. In: Reuter D. J., Robinson J. B. (Eds.). *Plant Analysis: An Interpretation Manual*. Inkata Press. Sydney, Australia.
- SAGARPA. 2010. SIACON. Sistema de información estadística agropecuaria de México. Versión 1.1. Se puede consultar en: [www.sagarpa.gob.mx](http://www.sagarpa.gob.mx) y [www.siap.sagarpa.gob.mx](http://www.siap.sagarpa.gob.mx) (17 / 02 / 2011).
- Sánchez G. P., Molinos D. C., Alcántar G. G. y Sandoval V. M. 2007. Diagnóstico nutrimental en plantas *In: Nutrición de cultivos*. Mundi Prensa México y Colegio de Postgraduados. Mexico D. F., pp 201-247.
- Siller, C. J. H. 2006. Situación actual de la industria hortofrutícola en México. *In: http://www.uaaan.mx/academic y Horticultura/Memhort03/Ponencia\_04.pdf*
- Snyder, G. R; 2006. Guía del cultivo de tomate en invernaderos. Mississippi State University Extension Service. *In: http://www.msucare.com*
- StatSoft Inc., 2004. *Statistica for Windows (Computer Program Manual)*. StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA.
- Steiner, A. A. 1984. The selective capacity of plants for ion and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Proc. Of the 5<sup>th</sup> Int. Congress on Soils Culture*, Wageningen, May 1980, pp 83–95.
- Sumner, M. E. and F. C. Boswell. 1981. Alleviating nutrient stress. In: Arking G. F. and H. M. Taylor. *Modifying the root environment to reduce crops stress*. Amer. Soc. Agr. Eng. Monograph 4.

- Taiz L. and H. Zeiger. 1998. *Plant Physiology*. 2nd Ed. Sinauer Associates Publishers, Sunderland; Massachusetts.
- Tremblay, N., P. Auclair, L. E. Parent and A. Gosselin. 1993. A multivariate diagnosis approach applied to celery. *Plant Soil* 154: 39–43.
- Uvalle, J. X. 1996. El diagnóstico diferencial integral. Memorias del Congreso Anual de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamps. México.
- Valdez C. R. D., Magallanes Q. R., Rubio S., García H. J. L., Murillo A. B., Troyo D. E., Blanco M. F. 2005. Normas nutrimentales DNC para chile (*Capsicum annuum*) tipo “Mirasol” seco. In: Second World Pepper Convention. Zacatecas, México. pp. 150–157.
- Walworth, J. L., and M. E. Sumner. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system. (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 6: 149–188.
- Walworth, J. L., M. E. Sumner, R. A. Isaac and C. O. Plank. 1986. Preliminary DRIS norms for alfalfa. *Agronomy Journal* 78: 1046–1052.