



REVISTA CHAPINGO SERIE  
HORTICULTURA

ISSN: 1027-152X

revistahorticultura29@gmail.com

Universidad Autónoma Chapingo  
México

Blanco-Macías, F.; Lara-Herrera, A.; Valdez-Cepeda, R. D.; Cortés-Bañuelos, J. O.; Luna-Flores, M.;  
Salas-Luevano, M. A.

Interacciones nutrimentales y normas de la técnica de nutrimento compuesto en nopal (*Opuntia ficus-  
indica* L. Miller)

REVISTA CHAPINGO SERIE HORTICULTURA, vol. 12, núm. 2, julio-diciembre, 2006, pp. 165-175  
Universidad Autónoma Chapingo  
Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=60912206>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# INTERACCIONES NUTRIMENTALES Y NORMAS DE LA TÉCNICA DE NUTRIMENTO COMPUESTO EN NOPAL (*Opuntia ficus-indica* L. Miller)

F. Blanco-Macías<sup>1,2</sup>; A. Lara-Herrera<sup>1</sup>; R. D. Valdez-Cepeda<sup>2,3¶</sup>;  
J. O. Cortés-Bañuelos<sup>1</sup>; M. Luna-Flores<sup>1</sup>; M. A. Salas-Luevano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Agronomía.  
Programa de Maestría en Ciencias Agrícolas.  
Km. 20. Carretera Zacatecas-Guadalajara (vía corta),  
Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Centro Norte.  
Apartado Postal 196. Zacatecas, Zacatecas. C. P. 98001. MÉXICO.  
Correo-e: vacrida@hotmail.com, vacrida@gmail.com (¶Autor responsable)

<sup>3</sup>Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Matemáticas.  
Cuerpo Académico de Sistemas Complejos. Calzada Solidaridad Esq. Carretera a La Bufa.  
Zacatecas, Zacatecas. C. P. 98060. MÉXICO

## RESUMEN

Hacen falta conocimientos básicos sobre la nutrición del nopal, esto para hacerlo más productivo. En ese contexto, se utilizó la técnica de Diagnóstico de Nutrimiento Compuesto (DNC) para definir normas preliminares de nutrición en nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller), sustentada en la relación cúbica entre los rendimientos y las funciones de proporción de varianza acumulada, así como en la función de distribución  $\chi^2$  de los índices de nutrición global. Se consideró una base de datos con 180 observaciones de rendimiento (expresado en peso fresco de cladodio por planta) y las concentraciones (%) de N, P, K, Ca y Mg en cladodios de un año de edad. El rendimiento de biomasa de nopal depende significativamente de las concentraciones de N ( $P \leq 0.01$ ), K ( $P \leq 0.05$ ) y Mg ( $P \leq 0.05$ ). Se apreciaron los siguientes sinergismos significativos: P-K ( $P \leq 0.05$ ), K-Mg ( $P \leq 0.01$ ) y Mg-Ca ( $P \leq 0.01$ ); y los antagonismos: N-Ca ( $P \leq 0.01$ ) y N-Mg ( $P \leq 0.05$ ). Las normas preliminares de DNC propuestas y expresadas como logaritmos de las proporciones centradas (media  $\pm$  desviación estándar) para  $d = 5$  nutrientes, con base en una subpoblación ( $n = 57$ ) de alto rendimiento (más de 46.7 kg-planta<sup>-1</sup> de cladodios de nopal cultivado en un suelo calcáreo) son:  $V_N^* = -0.98 \pm 0.35$ ,  $V_P^* = -2.23 \pm 0.21$ ,  $V_K^* = 0.25 \pm 0.19$ ,  $V_{Ca}^* = 0.37 \pm 0.35$ ,  $V_{Mg}^* = -0.71 \pm 0.17$ , y  $V_{R_d}^* = 3.29 \pm 0.09$ . Esas normas corresponden a los siguientes rangos de concentraciones óptimas (medias  $\pm$  desviación estándar) en los cladodios: 1.29  $\pm$  0.47 de N (%), 0.36  $\pm$  0.08 de P (%), 4.24  $\pm$  0.88 de K (%), 4.96  $\pm$  1.73 de Ca (%) y 1.61  $\pm$  0.27 de Mg (%). El nopal concentra más de cuatro veces K y Ca que N, demostrando que es una planta calcitrófica. Algo similar ocurre entre Mg y P, pues el primero se concentra cuatro veces más que el segundo.

**PALABRAS CLAVE ADICIONALES:** nutrición, diagnóstico nutrimental, sinergismos, antagonismos, distribución  $\chi^2$ .

## NUTRIENT INTERACTION AND NORMS FOR THE COMPOUNDED NUTRIENT TECHNIQUE IN (*Opuntia ficus-indica* L. Miller)

### ABSTRACT

There is a lack of basic knowledge on nopal cactus nutrition that would help to increase its productivity. In this context, we used the technique of Compounded Nutrient Diagnosis (DNC) to define preliminary norms for nutrition in nopal cactus (*Opuntia ficus-indica* L. Miller), based on the cubic relation between yields and accumulated variance proportion functions, as well as the  $\chi^2$  distribution function of global nutrition indices. We considered a database that included 180 yield observations (as cladode fresh weight per plant) and the of N, P, K, Ca and Mg concentrations (%) in one-year-old cladodes. Biomass yield of nopal cactus depends significantly on N ( $P \leq 0.01$ ), K ( $P \leq 0.05$ ) and Mg ( $P \leq 0.05$ ) concentrations. We observed the following significant synergisms: P-K ( $P \leq 0.05$ ), K-Mg

( $P \leq 0.01$ ) and Mg-Ca ( $P \leq 0.01$ ); and the antagonisms: N-Ca ( $P \leq 0.01$ ) y N-Mg ( $P \leq 0.05$ ). The DNC preliminary proposed norms expressed as logarithms of the centered proportions (mean  $\pm$  standard deviation) for  $d = 5$  nutrients, based on a high-yielding (more than 46.7 kg·plant<sup>-1</sup> nopal cactus cladodes grown in a calcareous soil) sub-population ( $n = 57$ ) are:  $V_N^* = -0.98 \pm 0.35$ ,  $V_P^* = -2.23 \pm 0.21$ ,  $V_K^* = 0.25 \pm 0.19$ ,  $V_{Ca}^* = 0.37 \pm 0.35$ ,  $V_{Mg}^* = -0.71 \pm 0.17$ , and  $V_{R_d}^* = 3.29 \pm 0.09$ . These norms correspond to the following ranges of optimal concentrations (mean  $\pm$  standard deviation) in the cladodes: 1.29  $\pm$  0.47 of N (%), 0.36  $\pm$  0.08 of P (%), 4.24  $\pm$  0.88 of K (%), 4.96  $\pm$  1.73 of Ca (%) and 1.61  $\pm$  0.27 of Mg (%). Nopal cactus concentrates more than four times K and Ca than N, proving that it is a calcitrophic plant. Something similar occurs between Mg and P, because the former is four times higher in concentration than the latter.

**ADDITIONAL KEY WORDS:** nutrition, nutrient diagnosis, synergisms, antagonisms,  $\chi^2$  distribution.

## INTRODUCCIÓN

El nopal está distribuido ampliamente en las regiones semiáridas de México, como cultivo y en forma silvestre; la superficie cultivada supera las 50,000 ha, y la silvestre es cercana a 3,000,000 ha. Para los habitantes de estas regiones, el nopal es un recurso valioso por la gran diversidad de usos para consumo humano y animal. Los frutos se destinan al consumo en fresco y a la elaboración de queso de tuna, melcocha, miel y vino, entre otros productos. Los cladodios jóvenes se utilizan como verdura para elaborar ensaladas y guisos especiales; también se usa como forraje, principalmente en la época de estiaje (Pimienta, 1990).

El nopal es una planta rústica, que por sus características fisiológicas puede cultivarse a bajo costo; quizá por ello, las plantaciones comerciales de nopal para producir fruta y verdura han aumentado considerablemente en los estados de Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco y Estado de México (Barrientos, 1990). Sin embargo, el manejo de las huertas se realiza con prácticas empíricas, lo cual se refleja en una problemática diversa con respecto al establecimiento de éstas, fertilización-nutrición, control de plagas y enfermedades, cosecha, manejo en poscosecha y comercialización, principalmente.

Es ampliamente reconocido que las plantas que padecen desórdenes nutrimentales son más susceptibles a plagas y enfermedades. Desafortunadamente, poco se conoce sobre los requerimientos nutrimentales del nopal, así como la ocurrencia de sinergismos y antagonismos nutrimentales, para que así sea factible corregir desórdenes nutrimentales mediante la adición de fertilizantes al suelo o aspersión de fertilizantes foliares.

En muchas especies cultivadas se han definido concentraciones óptimas, niveles críticos y rangos de suficiencia de los nutrimentos minerales que se relacionan con el rendimiento e interacciones nutrimentales que afectan la respuesta de las plantas. Con relación al análisis de tejido en nopal, se han desarrollado pocos estudios sobre la definición de concentraciones óptimas de los nutrimentos en los cladodios (Cuadro 1) y de diagnóstico nutrimental

con base en valores de referencia o normas nutrimentales. Gatahara *et al.* (1989) definieron las concentraciones óptimas de N (1.16 %) y P (0.115 %) en cladodios de *O. engelmannii* para producción de tuna. Por su parte, Claaessens y Wessels (1997), estimaron rangos de concentración óptimos para N (0.94 a 0.96 %), P (0.15 a 0.2 %), Ca (1.8 a 2.5 %) y Mg (0.7 a 1.1 %) y concentración media óptima de K (1.5 %) en cladodios de *O. ficus indica* para producción de tuna en nopales creciendo en suelos ácidos. Recientemente, Galizzi *et al.* (2004), reportaron los rangos óptimos de concentración de N (0.8 a 0.9 %), K (2 a 6 %), Ca (2 a 6 %) y la concentración óptima de Mg (1.2 %) en cladodios de *O. ficus indica* para producción de tuna. En los tres casos, sin embargo, no se asocian esas composiciones a algún rendimiento de referencia. En cambio, Valdez-Cepeda *et al.* (2003) y Magallanes *et al.* (2003), así como Hernández (2004) han reportado rangos de concentración óptima para N, P, K, Ca y Mg (Cuadro 1) asociados con rendimientos mayores a 35 (en los dos primeros casos) y 38 kg de materia fresca de cladodios por planta (en el último caso) en *O. ficus indica*. El contar con una composición nutrimental de referencia, asociada a rendimientos, facilita los procesos para diagnosticar correctamente el estado nutrimental y recomendar la aplicación adecuada de fertilizantes para no sub o sobrefertilizar en detrimento, tanto del fin empresarial en parcelas comerciales, como del ambiente dado el efecto, a veces negativo, de los productos agroquímicos.

En este contexto se han desarrollado muchas técnicas de diagnóstico nutrimental de las plantas cultivadas. Entre ellas se encuentran las siguientes: valor crítico, VC (Bates, 1971); sistema integrado de diagnóstico y recomendación, DRIS (Walworth y Sumner, 1987) y diagnóstico de nutriente compuesto, DNC (Parent y Dafir, 1992). En el caso de la técnica de VC, una concentración se define arbitrariamente, por lo general se considera el 90 o 95 % del rendimiento máximo y se supone que, excepto el nutrimento del caso, los demás están en cantidades suficientes y no excesivas. En los casos de DRIS y DNC la población de altos rendimientos se selecciona de manera diferente. Con respecto al DRIS, no se ha establecido un procedimiento formal para dividir el total de observaciones en dos grupos: uno de alto rendimiento y otro de bajo rendimiento; esa

**CUADRO 1. Concentraciones óptimas de nutrientes en cladodios de *Opuntia* spp.**

Nutriente (%)	Media <sup>a</sup>	Rango <sup>b*</sup>	Rango o media <sup>c</sup>	Rango o media <sup>d</sup>	Rango <sup>e*</sup>
N	1.16	0.86 - 1.08	0.94 - 0.96	0.8 - 0.9	0.72 - 1.21
P	0.115	0.28 - 0.35	0.15 - 0.20	0.29 - 0.41	
K	3.42 - 5.52	1.5	2 - 6	3.56 - 5.53	
Ca	3.90 - 4.83	1.8 - 2.5	2 - 6	4.09 - 6.45	
Mg	1.24 - 1.70	0.7 - 1.1	1.2	1.47 - 2.11	

<sup>a</sup>Gathaara *et al.* (1989) en *Opuntia engelmannii* para producción de tuna.

<sup>b</sup>Valdez-Cepeda *et al.* (2003) y Magallanes *et al.* (2003) en *O. ficus-indica* L. Miller para rendimientos mayores de 35 kg de materia fresca de cladodio por planta (n=36)

<sup>c</sup>Claessens y Wessels (1997) en *O. ficus-indica* L. Miller para producción óptima de tuna.

<sup>d</sup>Galizzi *et al.* (2004) en *Opuntia ficus-indica* L. Miller para producción de tuna.

<sup>e</sup>Hernández (2004) en *Opuntia ficus-indica* L. Miller para rendimientos mayores de 38 kg de materia fresca de cladodio por planta (n=108)

\*En cladodios de un año de edad.

partición se logra con la técnica del DNC al considerar la relación cúbica entre el rendimiento y cada una de las funciones de proporción de varianza acumulada (Parent y Dafir, 1992); en otras palabras, la técnica DNC se sustenta en procedimientos estadísticos robustos. Khiari *et al.* (2001b), entre otros investigadores, han demostrado que los índices nutrimentales estimados con la técnica DNC se distribuyen simétricamente con respecto a un valor nulo de balance nutrimental y que también se correlacionan mejor con el rendimiento que los estimados a través de las técnicas DRIS y VC. Por lo anterior, se decidió usar a la técnica DNC en el presente trabajo.

Los objetivos planteados fueron los siguientes: (a) Identificar interacciones significativas entre nutrimentos y su relación con el rendimiento del cultivo de nopal y (b) Obtener las normas nutrimentales preliminares de nopal con fines de producción de biomasa mediante la técnica de diagnóstico de nutrimento compuesto.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Establecimiento del experimento

A mediados de marzo de 1999, fueron colectadas pencas madre de nopal en experimentos establecidos en las cercanías de la ciudad de Zacatecas y en predios de agricultores cooperantes de los municipios de Villanueva y Jalpa, Zac. Ese material vegetativo se trató químicamente con estreptomycin y caldo bordelés para prevenir enfermedades causadas por bacterias y hongos. Asimismo, se dejó que cicatrizaran a la sombra durante un mes.

El 13 de marzo de 1999 se preparó el suelo mediante dos pasos de rastra de discos con una penetración de 20 cm. La plantación de pencas o cladodios de nopal se realizó el 16 de abril de 1999, considerando una separación de un metro entre cladodios e hileras, de manera que se tuvo una densidad de 10 000 plantas·ha<sup>-1</sup>.

### Diseño experimental

Las plantas de nopal se distribuyeron en el campo en tres bloques al azar con arreglo en parcelas divididas considerando 12 tratamientos, producto de los factores variedad y fertilización. Las variedades fueron: "Jalpa", "Villanueva" y "Copena V-1", de la especie *Opuntia ficus-indica* L. Miller; las dosis de fertilización fueron: 00-00-00, 20-20-20, 40-40-40 y 60-80-80 kg·ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O, respectivamente; las fuentes fueron los fertilizantes urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio.

Con este esquema se pretendió inducir heterogeneidad en la composición del tejido vegetal y el rendimiento de biomasa de las diferentes variedades de nopal. Todo el fertilizante se aplicó el 20 de julio de 1999. Del año 2000 en adelante, el N se aplicó en dos fracciones: la primera mitad en la primavera al iniciar la brotación y la segunda en el verano. El fósforo y el potasio se aplicaron en primavera al inicio de la primera brotación.

### Mantenimiento del experimento

Los riegos se aplicaron cada 15 días, tanto en primavera como en otoño. Las malezas se controlaron en forma manual y mecánica con implementos rústicos de tracción animal. Estas dos prácticas de manejo se realizaron de la misma manera todos los años. En el huerto experimental no incidieron plagas o enfermedades, de manera que fue innecesario aplicar productos agroquímicos para su control. Se realizó una poda de formación con cuchillo procurando que las plantas tuvieran la misma arquitectura de tres pencas (primer piso) sobre el cladodio madre y tres sobre cada una de primer piso para contar con nueve pencas en segundo piso.

### Colecta y análisis de las muestras

#### Muestreo de suelo

El muestreo de suelo se efectuó el 29 de julio del 2004

y se tomaron 15 muestras simples al azar, las cuales conformaron la muestra compuesta. Las determinaciones realizadas en la muestra compuesta fueron: pH (potenciómetro; relación vol. suelo/ vol. agua: 1/2 ); materia orgánica (MO) (Walkley y Black); nitrógeno inorgánico (Ni) (extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor); fósforo (P) (Olsen); potasio (K) (extraído con acetato de amonio 1N, pH = 7; relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de emisión de flama); calcio (Ca) y magnesio (Mg) (extraídos con acetato de amonio 1N, pH = 7; relación 1:20 y determinados por espectrofotometría de absorción atómica); y hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y manganeso (Mn) (extraídos con DTPA relación 1:4 y determinados por espectrofotometría de absorción atómica); boro (B) (extraído con  $\text{CaCl}_2$  1M y determinado por fotocolorimetría de Azometina-H); y textura (Hidrómetro de Bouyoucus).

### Muestreo de cladodios

Todas las plantas de nopal del experimento tuvieron la estructura de tres (primer piso) y nueve (segundo piso) cladodios sobre la penca madre. Los cladodios de tercer piso que crecieron sobre los cladodios de segundo piso, así como los que crecieron sobre los tres cladodios de primer piso, se cortaron entre la última semana del mes de febrero a la primera del mes de marzo en los años considerados [(2002, 36 observaciones), (2003, 72 observaciones) y (2004, 72 observaciones)], así, con ellos se cuantificó el peso en fresco ( $\text{kg}\cdot\text{planta}^{-1}$ ). Posteriormente, se cuantificaron las concentraciones (%) de N, P, K, Ca y Mg con base en peso seco en uno o dos cladodios seleccionados al azar, según el año. Las determinaciones realizadas en tejido vegetal y los métodos empleados fueron: N (Kjeldahl); P (fotocolorimetría con molibdo vanadato); K, Ca y Mg (espectrofotometría de absorción atómica).

### Interacciones nutrimentales

Para la identificación de las interacciones entre los nutrimentos analizados en el tejido vegetal y su relación con el rendimiento del cultivo, 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 nutrimentos; mientras que cuando se relaciona algún nutrimento con el rendimiento, es posible evidenciar dependencia de éste con respecto al nutrimento del caso.

### Normas nutrimentales

En la técnica de DNC se considera que la composición del tejido vegetal forma un arreglo ( $S^d$ )  $d$  dimensional de nutrimentos; es decir, el tejido está compuesto de  $d$  nutrimentos más un valor o nutrimento de relleno  $R_d$  que

representa a los nutrimentos no determinados químicamente:

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

donde 100 es la concentración de materia seca (%); N, P, K, ... son las proporciones de nutrimentos y  $R_d$  es el nutrimento de relleno estimado al considerar el 100 % y la suma de las  $d$  proporciones de nutrimentos:

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

Esas proporciones se hacen invariantes en escala después de que se dividen por la media geométrica G:

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

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

$$V_N = 1n\left(\frac{N}{G}\right), V_P = 1n\left(\frac{P}{G}\right), V_K = 1n\left(\frac{K}{G}\right), \dots, V_{R_d} = 1n\left(\frac{R_d}{G}\right) (4)$$

De manera que

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

donde  $V_x$  es la expresión del logaritmo de la proporción centrada para el nutrimento X. Se debe tomar nota que estas expresiones son proporciones múltiples, pues involucran a todos los nutrimentos considerados, incluyendo al complemento o relleno ( $R_d$ ) pues es considerado como tal.

Por definición, la suma de los componentes de un tejido es 100 % (Ecuación 1) y la suma de los logaritmos de las proporciones centradas de los  $d$  nutrimentos y de  $R_d$  debe ser cero (Ecuación 5). Esta operación permite asegurar que las estimaciones se han hecho correctamente.

### Selección de la subpoblación con alto rendimiento

Para estimar el punto de inflexión, producto de la relación entre el rendimiento y las funciones de proporción de varianza acumulada, se siguieron los siguientes pasos:

a) El rendimiento se obtuvo al pesar la masa de los cladodios de 10 a 12 meses de edad, cortadas de la planta en el tercer nivel o estrato, más los que crecieron sobre las pencas de primer estrato. Se ordenaron las 180 observaciones considerando el rendimiento en orden decreciente. Cada observación consistió de las

concentraciones de N, P, K, Ca y Mg (en %) y rendimiento (en kg de masa en fresco de cladodio por planta).

b) Se estimaron los logaritmos de las proporciones centradas de las proporciones de los nutrimentos usando las ecuaciones 2, 3 y 4.

c) Se usó el procedimiento iterativo de Cate-Nelson para dividir a la población en subpoblaciones de alto y bajo rendimiento; la primera involucró las dos primeras observaciones y las restantes conformaron la de bajo rendimiento; después, las tres primeras se consideraron de rendimiento alto y el resto de rendimiento bajo y, así sucesivamente hasta que las dos observaciones de menor rendimiento formaron el grupo de bajo rendimiento y, el resto el grupo de alto rendimiento.

d) De cada subpoblación se estimó la varianza de los  $V_x$ , para estimar la proporción de varianza de los componentes 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 de la proporción centrada DNC para el nutriente X.

e) La función de proporción de varianza acumulada se estima considerando 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 es estimada 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 estima con la siguiente formula:

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

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) La función de proporción de varianza acumulada  $F_i^C$

( $V_x$ ) se relaciona con el rendimiento, Y, mediante un patrón cúbico:

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

g) El punto de inflexión (donde el modelo muestra un cambio en concavidad) se estima 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 obtiene el valor del punto de inflexión ( $-b/3a$ ):

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

El rendimiento más alto asociado a alguna de las expresiones de los nutrimentos fue seleccionado para asegurar que el rendimiento mínimo asociado a una subpoblación de alto rendimiento sea clasificado como un rendimiento alto para cualquier expresión nutrimental.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Condiciones edáficas del sitio experimental

El suelo es de textura franca, con pH moderadamente alcalino y alto contenido de materia orgánica (Cuadro 2); esto último se debe a que aproximadamente durante más de 50 años la parcela se utilizó como huerta de árboles frutales [(peral (*Prunus malus* L.), ciruelo (*Prunus doméstica* L.), manzano (*Malus pumila* Mill.)], entre otros y se incorporaba al suelo su follaje, así como estiércol de bovino.

La disponibilidad de nitrógeno inorgánico es baja, la de fósforo es muy alta, media la de potasio, alta la de calcio, moderadamente alta la de magnesio, moderadamente baja la de hierro, muy alta la de cobre, excesiva la de zinc, moderadamente baja la de manganeso y media la de boro. La disponibilidad de calcio es alta, debido a que el suelo es de origen calcáreo (Cuadro 2).

### Estado nutrimental de las plantas de nopal

Las 180 muestras de cladodios de un año de edad generaron los estimadores estadísticos básicos de las variables en estudio que se aprecian en el Cuadro 3. Es apreciable que el supuesto de inducir heterogeneidad en la composición del tejido vegetal y el rendimiento de biomasa

**CUADRO 2. Características del suelo de la parcela experimental.**

Nutriente o factor	Cantidad	Interpretación de disponibilidad del nutriente o condición del factor
pH	7.50	Moderadamente alcalino
MO (%)	3.23	Alta
Ni (mg·kg <sup>-1</sup> )	15.00	Baja
P (mg·kg <sup>-1</sup> )	40.50	Muy alta
K (mg·kg <sup>-1</sup> )	230.00	Media
Ca (mg·kg <sup>-1</sup> )	4,371.00	Alta
Mg (mg·kg <sup>-1</sup> )	569.00	Moderadamente alta
Fe (mg·kg <sup>-1</sup> )	7.85	Moderadamente baja
Cu (mg·kg <sup>-1</sup> )	7.47	Muy alta
Zn (mg·kg <sup>-1</sup> )	14.60	Excesiva
Mn (mg·kg <sup>-1</sup> )	6.13	Moderadamente baja
B (mg·kg <sup>-1</sup> )	1.59	Media
Arena (%)	32.20	- -
Limo (%)	41.60	Textura franca
Arcilla (%)	26.20	- -

se cumplió, tal y como se planteó en el estudio.

El rango de N (Cuadro 3) es lo suficientemente amplio de manera que circunscribe a las medias y rangos óptimos reportados en el Cuadro 1.

Concerniente al P, la media y el rango reportados por Gathaara *et al.* (1989) y Claessens y Wessels (1987), respectivamente, son menores a los rangos evidenciados en el presente trabajo (Cuadro 3) y a los reportados por Valdez *et al.* (2003), Magallanes *et al.* (2003) y Hernández (2004) (Cuadro 1). Las diferencias se deben posiblemente, en parte, a que son distintas especies con respecto al caso de Gathaara *et al.* (1989) y a diferente propósito de producción con respecto al caso de Claessens y Wessels (1987).

La concentración media de K (1.5 %) reportada por Claessens y Wessels (1987), es menor al valor mínimo del rango encontrado en este trabajo (Cuadro 3), quizá debido a la diferencia de condiciones ambientales y propósito de producción; mientras que el rango (2 a 6 %) reportado por Galizzi *et al.* (2004), es ligeramente menos amplio que el encontrado en el presente trabajo de investigación (1.9 a 6.55 %, Cuadro 3). Los límites menores de los rangos reportados por Valdez *et al.* (2003), Magallanes *et al.* (2003) y Hernández (2004) (Cuadro 1) se ubican dentro de los rangos del Cuadro 3, al igual que los límites mayores.

Con respecto al Ca, el rango reportado por Claessens y Wessels (1987) (Cuadro 1) es menor al rango registrado (Cuadro 3) y su extremo mayor (2.5 %) es ligeramente superior al valor mínimo (2.21 %) del presente caso, tal vez ello es debido a la diferencia entre condiciones ambientales

y propósitos de producción; mientras que el rango (2 a 6 %) consignado por Galizzi *et al.* (2004) es menos amplio que el observado en la presente investigación (2.21 a 8.21 %, Cuadro 3). El rango reportado por Valdez *et al.* (2003) y Magallanes *et al.* (2003), se ubica dentro del rango mostrado en el Cuadro 3.

Con referencia al Mg, es apreciable que el extremo inferior (0.7 %) del rango reportado por Claessens y Wessels (1987) (Cuadro 1), es menor que el mínimo (0.91 %), resultado del presente estudio (Cuadro 3); por otro lado, la media (1.2 %, Cuadro 1), reportada por Galizzi *et al.* (2004), se ubica dentro del rango (0.1 a 2.55 %, Cuadro 3) encontrado en el presente caso, al igual que los rangos reportados por Valdez *et al.* (2003), Magallanes *et al.* (2003) y Hernández (2004).

En general, la variación de la concentración de los cinco nutrimentos (CV=33.93 % para N, CV=19.44 % para P, CV=20.14 % para K, CV=30.98 % para Ca y CV=21.19 % para Mg) y el rendimiento (CV=36.41 %) apreciadas en el Cuadro 3, más el hecho de que los rangos, en general, comprenden a las concentraciones medias y rangos óptimos mostrados en el Cuadro 1, sugieren que la base de datos (n = 180), aunque pequeña, puede ser de gran utilidad para la generación de conocimiento con respecto a las interacciones nutrimentales y definir normas preliminares de nutrición en nopal con fines de producción de cladodios, puesto que implica composiciones asociadas a rendimientos dentro del rango de 12.7 a 71.7 kg de materia fresca de cladodio por planta (Cuadro 3). Posiblemente, la heterogeneidad de la composición química de los cladodios y del rendimiento, apreciable en el Cuadro 3, se debe principalmente al efecto de los diferentes tratamientos de fertilización, entre

**CUADRO 3. Estimadores estadísticos de las variables rendimiento (kg materia fresca de cladodio por planta) y concentración de nutrimentos en cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) de un año de edad (n=180).**

Variable (%)	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Coefficiente variación (%)
Rendimiento (kg-materia <sup>1</sup> fresca de cladodio por planta)	37.65	13.71	12.70	71.70	36.4
N	1.12	0.38	0.52	2.44	33.9
P	0.36	0.07	0.16	0.56	19.4
K	4.12	0.83	1.90	6.55	20.1
Ca	4.68	1.45	2.21	8.20	31.0
Mg	1.51	0.32	0.91	2.55	21.2

otros factores. En ese sentido, se construyó una matriz de correlaciones considerando el coeficiente de Pearson para identificar interacciones significativas entre cada par de nutrimentos, o bien entre algún nutrimento y el rendimiento (Cuadro 4).

#### Interacciones significativas entre nutrimentos en nopal

Se apreciaron las interacciones significativas siguientes: sinergismos P-K ( $P \leq 0.05$ ), K-Mg ( $P \leq 0.01$ ) y Mg-Ca ( $P \leq 0.01$ ); antagonismos N-Ca ( $P \leq 0.01$ ) y N-Mg ( $P \leq 0.05$ ) (Cuadro 4). Ello sugiere que es posible se incremente o disminuya la concentración de algunos de los elementos cuando se apliquen fertilizantes fosfatados, potásicos y magnésicos. Con la adición de nitrógeno se puede inducir menores concentraciones de Ca y Mg, o bien un efecto de dilución-acumulación de cada uno de esos elementos con respecto al N. Sin embargo, las posibilidades de que el Ca se diluya son bajas puesto que las plantas de nopal tienden a acumular más Ca en sus tejidos conforme aumenta su edad (Magallanes *et al.*, 2003; Valdez *et al.*, 2003; Lüttge, 2004).

El rendimiento de nopal depende significativamente de las concentraciones de N ( $P \leq 0.01$ ), K ( $P \leq 0.05$ ) y Mg ( $P \leq 0.05$ ) (Cuadro 4). Los coeficientes de correlación positivos sugieren que el rendimiento puede incrementar si se asocia con un

aumento de concentración de esos elementos en los cladodios; es decir, es de esperar que los rendimientos aumenten al fertilizar con N, Mg y K.

El hecho de que los nutrimentos Ca, K y Mg sean los que se encuentran en mayores cantidades en los cladodios de un año de edad (Cuadro 3), marca la diferencia con respecto a otras plantas cultivadas, en las cuales el papel de macronutrimentos corresponden al N, P y K. En nopal, el Ca, K y Mg son los nutrimentos que se concentraron en mayor proporción en los cladodios. De las interacciones significativas, el sinergismo P-K es, quizá, el más reportado en la literatura por la importancia económica que ha revestido en otras especies cultivadas.

No se tiene explicación fisiológica alguna sobre la interacción positiva K-Mg. Algunos investigadores han observado esta interacción en otras especies, pero a manera de antagonismo [e.g. en plátano (*Musa paradisiaca* L.) por Raghupathi *et al.* (2002) y zanahoria (*Daucus carota* L.) por Parent *et al.* (1994)].

La interacción Mg-Ca tiende a justificarse más en forma negativa que positiva en plantas con metabolismo  $C_3$  y  $C_4$ , como se presentó en este caso (plantas con metabolismo con base en ácido crasuláceo), puesto que generalmente ocurre una fuerte competencia entre los iones

**CUADRO 4. Coeficientes de correlación de Pearson entre el rendimiento (kg materia fresca de cladodio por planta) y la concentración de nutrimentos en cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) de un año de edad (n=180).**

Concentración (%)	Rendimiento (kg materia fresca de cladodio por planta)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)	P (%)
Ca	0.125				
Mg	0.180**	0.227			
K	0.167**	-0.116	0.381**		
P	-0.032	0.024	-0.069	0.149	
N	0.349	-0.316	-0.169*	-0.061	0.118

\*, \*\*: Significativo a una  $P \leq 0.05$  y 0.01, respectivamente.



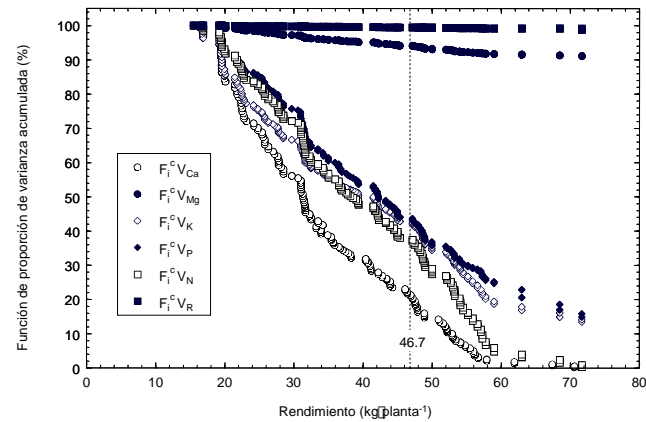
Ca y Mg en los sustratos, lo cual induce a un incremento de concentración de Ca y a una marcada reducción de concentración de Mg en los tejidos de las plantas (Grattan y Grieve, 1999). Así pues, el que en el presente caso haya ocurrido en forma positiva puede deberse a la tendencia de las plantas de nopal a acumular Ca en sus tejidos conforme avanzan en edad y a la moderadamente alta disponibilidad de este nutriente en el suelo del sitio experimental (Cuadro 2), sin inducir competencia del Ca con el Mg.

Los antagonismos N-Ca y N-Mg han sido observados en otros cultivos (e.g. en plátano por Raghupathi *et al.* (2002) y especialmente N-Ca en zanahoria (Parent *et al.*, 1994). Por consiguiente, puede señalarse la posibilidad, en ambos casos, de un fenómeno de acumulación-dilución (Parent *et al.*, 1994).

**Normas preliminares de diagnóstico de nutriente compuesto en nopal**

El rendimiento crítico útil para separar las observaciones en subpoblaciones de alto y bajo rendimiento se determinó al examinar la relación entre el rendimiento y cada una de las cinco funciones de proporción de varianza acumulada (Figura 1). El modelo cúbico presentó ajuste estadístico significativo en todos los casos (Cuadro 5; Figura 1). Los puntos de inflexión de las funciones asociadas a N, P, K, Ca, Mg y R<sub>d</sub> fueron 40.3, 36.7, 35.3, 33.2, 35.4 y 46.7 kg de materia fresca de cladodio por planta, respectivamente.

La teoría de la técnica de DNC recomienda que el rendimiento considerado para definir la partición en subpoblaciones de bajo y alto rendimiento, con el que se estima el valor crítico de la función de distribución acumulada de  $\chi^2$  (Khiari *et al.*, 2001a; García *et al.*, 2004abc), sea el rendimiento mayor asociado a cualquier punto de inflexión en los modelos cúbicos ajustados; por lo tanto, se decidió tomar como rendimiento de referencia 46.7 kg de materia fresca de cladodio por planta (rendimiento asociado al punto de inflexión de la función de proporción de varianza



**FIGURA 1.** Funciones cúbicas experimentales que relacionan el rendimiento y las funciones de proporción de varianza acumulada en el arreglo S<sup>5</sup> para estimar el punto de inflexión y el rendimiento crítico (46.7 kg peso fresco de cladodio por planta) para separar las subpoblaciones de alto y bajo rendimiento en *Opuntia ficus-indica* L. Miller.

acumulada de R). Con ello, 57 (31.7 %) observaciones corresponden a la subpoblación de alto rendimiento y 123 (68.3 %) a la subpoblación de bajo rendimiento.

El 78 % de la función de distribución acumulada de DNC R<sup>2</sup> estuvo asociada a un valor de  $\chi^2 = 3.9$  (Figura 2). Otros autores han usado 70 % como satisfactorio (Khiari *et al.*, 2001a); sin embargo, los investigadores que lleguen a utilizar esta técnica para el cultivo del nopal, con propósito de producción de pencas para propagación vegetativa, deben tomar en cuenta ese valor de  $\chi^2$  si van a validar las normas del presente trabajo, como lo señalan Khiari *et al.* (2001a). Asimismo, se debe considerar que al incrementar el porcentaje de observaciones en la subpoblación de alto rendimiento cambiará también el valor de  $\chi^2$ , puesto que la subpoblación proveerá mayor ponderación que la de bajo rendimiento (García *et al.*, 2004 ab).

**CUADRO 5.** Modelos cúbicos y puntos de inflexión (-b/3a) para cada proporción de los logaritmos centrados.

Nutriente	$F_i^C(V_X) = aX^3 + bX^2 + cX + d$	R <sup>2</sup>	-b/3a(kg materia fresca de cladodio por planta)
N	$F_i^C(V_N) = 0.0007X^3 - 0.0847X^2 + 0.9379X + 100$	0.9898	40.3
P	$F_i^C(V_P) = 0.0007X^3 - 0.0770X^2 + 0.8351X + 100$	0.9916	36.7
K	$F_i^C(V_K) = -0.0005X^3 - 0.0529X^2 + 0.0778X + 100$	0.9769	35.3
Ca	$F_i^C(V_{Ca}) = 0.0009X^3 - 0.0897X^2 + 0.4648X + 100$	0.9731	33.2
Mg	$F_i^C(V_{Mg}) = 8E-05 X^3 - 0.0085 X^2 + 0.0936 X + 100$	0.9912	35.4
R <sub>d</sub>	$F_i^C(V_{R_d}) = 5E-06 X^3 - 0.0007 X^2 + 0.0068 X + 100$	0.9820	46.7

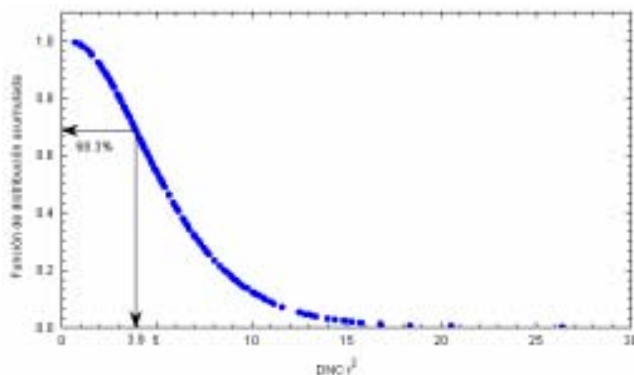


FIGURA 2. Función de distribución acumulada de  $\chi^2$  con seis (6) grados de libertad para obtener el valor crítico teórico de DNC R<sup>2</sup> (46.7 kg peso fresco de cladodios de tercer piso por planta) en el arreglo S<sup>o</sup> asociado al 68.3 % de la población (subpoblación de bajo rendimiento en *Opuntia ficus-indica*).

Los valores medios de  $V_N$ ,  $V_P$ ,  $V_K$ ,  $V_{Ca}$  y  $V_{Mg}$  y las desviaciones estándar de las 57 observaciones de alto rendimiento (Cuadro 6) son las normas ( $V_N^*$ ,  $V_P^*$ ,  $V_K^*$ ,  $V_{Ca}^*$ ,  $V_{Mg}^*$  y  $V_{R_d}$ , respectivamente), que se encontraron en el presente trabajo para nopal según la técnica de DNC. La suma igual a cero indica que los cálculos se realizaron adecuadamente (Cuadro 6). Estas normas son válidas para el estado de Zacatecas (de donde provienen los datos), el tamaño de la población ( $n = 180$  observaciones) y al método de análisis usado; una base de datos más amplia daría una validez de mayor amplitud a las normas, las cuales posiblemente se modificarán al incrementar esa base, al igual que el rendimiento de referencia, porque precisamente lo que debe de incrementarse es la subpoblación de altos rendimientos. Por consiguiente, es conveniente validar las normas del Cuadro 6 con resultados experimentales (Parent y Dafir, 1992).

El rango óptimo (0.82 a 1.76 %, media  $\pm$  desviación estándar) de N asociado a las normas DNC (Cuadro 7), circunscribe a las concentraciones medias y rangos óptimos reportados por otros autores (Cuadro 1), excepto los límites inferiores consignados por Galizzi *et al.* (2004) y Hernández (2004).

El rango óptimo (0.28 a 0.44 %) de P (Cuadro 7), incluye a los rangos señalados por Valdez *et al.* (2003) y Magallanes *et al.* (2003) y Hernández (2004); sin embargo, el rango (0.15 a 0.2 %, Cuadro 1) reportado por Claessens y Wessels (1997), y la concentración óptima (0.115 %) acotada por Gathaara *et al.* (1989), caen fuera del rango asociado a las normas DNC (Cuadro 7); esto puede deberse a la diferencia de objetivo de producción y a la diferencia de especies con respecto al caso de Gathaara *et al.* (1989), mientras que

CUADRO 6. Normas de diagnóstico de nutrimento compuesto para producción de cladodios de *Opuntia ficus-indica* L. Miller tomando como rendimiento de referencia 46.7 kg materia fresca de cladodio por planta.

Norma (logaritmo de proporción centrada)	Media	Desviación estándar
$V_N^*$	-0.98	0.35
$V_P^*$	-2.23	0.21
$V_K^*$	0.25	0.19
$V_{Ca}^*$	0.37	0.35
$V_{Mg}^*$	-0.71	0.17
$V_{R_d}^*$	3.29	0.09
Suma	0	

con respecto al caso de Claessens y Wessels (1997), la discrepancia puede asociarse al objetivo de producción diferente.

Los límites inferiores y superiores de los rangos reportados (Cuadro 1) por Valdez *et al.* (2003) y Magallanes *et al.* (2003) y Hernández (2004) para el K son mayores a los asociados a las normas DNC (3.36 a 5.12 %, Cuadro 7); mientras que el rango (2 a 6 %, Cuadro 1) señalado por Galizzi *et al.* (2004), es más amplio que el rango óptimo asociado a las normas DNC. La concentración media (1.5 %, Cuadro 1) consignada por Claessens y Wessels (1997), está fuera de las normas DNC (Cuadro 7); ello se debe probablemente a la diferencia de objetivos de producción y tipos de suelo, pues el de la parcela experimental donde trabajaron Claessens y Wessels (1997) es ácido, mientras que el de este caso es moderadamente alcalino de origen calcáreo (Cuadro 2).

El rango óptimo de Ca (3.23 a 6.69 %, Cuadro 7) incluye los rangos señalados por Valdez *et al.* (2003), Magallanes *et al.* (2003) y Hernández (2004); sin embargo, el rango (1.8 a 2.5 %, Cuadro 1) reportado por Claessens y Wessels (1997), y el límite inferior (2 %, Cuadro 1) del rango señalado por Galizzi *et al.* (2004) se ubican fuera del rango asociado a las normas DNC (Cuadro 1), lo cual pudiera deberse a la diferencia de objetivo de producción en ambos casos, pero también a la diferencia de ambiente con respecto al caso de Claessens y Wessels (1997).

Finalmente, con respecto al Mg, el rango óptimo (0.7 a 1.1 %, Cuadro 1) reportado por Claessens y Wessels (1997), y la concentración media óptima (1.2 %, Cuadro 1) consignada por Galizzi *et al.* (2004), están fuera del rango óptimo de concentración asociado a las normas DNC (1.34 a 1.88 %, Cuadro 7). Por su parte, los límites inferior (1.24 %,

**CUADRO 7. Concentraciones óptimas de nutrimentos para producción de cladodios de nopal. Rendimiento de referencia = 46.7 kg materia fresca de cladodio por planta.**

Nutriente	Concentración Media (%)	Desviación estándar (%)
N	1.29	0.47
P	0.36	0.08
K <sup>+</sup>	4.24	0.88
Ca <sup>2+</sup>	4.96	1.73
Mg <sup>2+</sup>	1.61	0.27

Cuadro 1) y mayor (2.11 %) de los rangos reportados por Valdez *et al.* (2003), Magallanes *et al.* (2003) y Hernández (2004), respectivamente, se ubican fuera del rango asociado a las normas DNC, lo cual posiblemente se debe a que se incrementó el rendimiento de referencia: de 35 (Valdez *et al.*, 2003; Magallanes *et al.*, 2003) y 38 (Hernández, 2004) a 46.7 (Cuadro 7) kg de materia fresca de cladodio por planta.

Con fines de optimizar la producción de biomasa (>46.7 kg materia fresca de cladodio por planta), el K y Ca se concentran más de cuatro veces que el N en plantas de nopal (Cuadro 7). Algo similar ocurre entre Mg y P, pues el primero se concentra cuatro veces más que el segundo. Estos resultados sugieren que el nopal es diferente a la mayoría de las plantas cultivadas, quizá debido al tipo de metabolismo y a la particularidad de ser planta calcitrófica (Lüttge, 2004).

### CONCLUSIONES

Las interacciones Mg-Ca, Mg-K y K-P en cladodios de nopal fueron significativas y se manifiestan como sinergismos. Las interacciones Ca-N y Mg-N fueron significativas y se manifiestan como antagonismos. El rendimiento (kg de materia fresca de cladodio por planta) de nopal es significativamente dependiente de las concentraciones de Mg, Ca y N en cladodios de un año de edad.

Las normas preliminares de diagnóstico de nutrimento compuesto, para *O. ficus-indica*, propuestas y expresadas como logaritmos de las proporciones centradas en una subpoblación de alto rendimiento (>46.7 kg materia fresca de cladodio por planta) son:  $V_N^* = -0.98 \pm 0.35$ ,  $V_P^* = -2.23 \pm 0.21$ ,  $V_K^* = 0.25 \pm 0.19$ ,  $V_{Ca}^* = 0.37 \pm 0.35$ ,  $V_{Mg}^* = -0.71 \pm 0.17$ ,  $V_{Rq}^* = 3.29 \pm 0.09$ . Los rangos óptimos correspondientes para concentraciones de nutrimentos son: N =  $1.29 \pm 0.47$  %, P =  $0.35 \pm 0.08$  %, K =  $4.24 \pm 0.88$  %, Ca =  $4.96 \pm 1.73$  %, Mg =  $1.61 \pm 0.27$  %.

El nopal concentra más de cuatro veces K y Ca que N en cladodios de un año de edad. Algo similar ocurre entre Mg y P, pues el primero se acumula cuatro veces más que el segundo. Esto hace que esta especie sea diferente en cuanto a requerimientos nutrimentales a muchas de las especies de plantas cultivadas.

### AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Investigación en Fruticultura de la Universidad Autónoma Chapingo por el financiamiento parcial del proyecto Clave No. 230308 y al Laboratorio de Análisis Químico del CIBNOR, en especial a los Drs. Bernardo Murillo Amador y José Luis García Hernández.

### LITERATURA CITADA

- BARRIENTOS, P. F. 1990. Establecimiento de viveros de nopal, pp. 21. *In: Memorias IV Reunión Nacional y II Congreso Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. SOMECH, A. C., INCA-Rural-CECCAM. Zacatecas, Zacatecas, México.
- BATES, T. E. 1971. Factor affecting critical nutrient concentrations in plant and their evaluation: A review. *Soil Sci.* 112: 116-130.
- CLAAESSENS, A. S.; WESSELS, A. B. 1997. The fertilizer requirements of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) under summer rainfall conditions in South Africa. *In: INGLESE, P.; M.O. BRUTSCH.* Proc. III Int. Congress on Cactus Pear and Cochenille. *Acta Hort.* 438: 83-95.
- GALIZZI, F. A.; FELKER, P.; GONZÁLEZ, C.; GARDINER, D. 2004. Correlations between soil and cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality in cactus pears, *Opuntia ficus-indica* in a traditional farm setting in Argentina. *J. Arid Environm.* 59(1): 115-132.
- GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; MURILLO, A. B.; NIETO, G. A.; BELTRÁN-MORALES, L. F.; MAGALLANES, Q. R.; TROYO, D. E. 2004a. Compositional nutrient diagnosis and main nutrient interactions in yellow pepper grown on desert calcareous soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 509-515.
- GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; AVILA, S., N. Y.; MURILLO, A. B.; NIETO, G. A.; MAGALLANES, Q. R.; LARRINAGA, M. J.; TROYO, D. E. 2004b. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms for cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) grown on desert calcareous. *Plant and Soil* 271(1-2): 297-307.
- GATHAARA, G.N.; FELKER, P.; LAND, M. 1989. Influence of nitrogen and phosphorus application on *Opuntia engelmannii* tissue N concentrations, biomass production and fruit yield. *J. Arid Environm.* 16: 337-347.
- GRATAN, S. R.; GRIEVE, C. M. 1999. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Sci. Hort.* 78: 127-157.
- HERNÁNDEZ, L. P. 2004. Normas preliminares de diagnóstico de nutrimento compuesto para nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller). Tesis Profesional. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. 83 p.
- KHIARI, L.; PARENT, L. E.; TREMBLAY, N. 2001a. Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agron. J.* 93: 802-808.
- KHIARI, L.; PARENT, L. E.; TREMBLAY, N. 2001b. The Phosphorus Com-

- positional Nutrient Diagnosis Range for Potato. *Agron. J.* 93: 815-819.
- LÜTTGE, U. 2004. Ecophysiology of Crassulacean Acid Metabolism (CAM). *Ann. Bot.* 93: 629-652.
- MAGALLANES, Q. R., VALDEZ-CEPEDA, R. D.; PÉREZ, V. O.; BLANCO, M. F.; MURILLO, A. B.; MÁRQUEZ, M. M.; RUIZ-GARDUÑO, R. R.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L. 2003. Normas preliminares de diagnóstico nutricional en *Opuntia ficus-indica*, pp. 293-297. *In: Memoria IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional Sobre Conocimiento y Aprovechamiento de Nopal.* ESPARZA, F. G.; SALAS-LUEVANO, M. A.; MENA, C. J.; VALDEZ-CEPEDA, R. D. (eds.). Zacatecas, Zacatecas, México.
- PARENT, L. E.; DAFIR, M. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 117: 239-242.
- PARENT, L. E.; ISFAN, D.; TREMBLAY, N.; KARAM, A. 1994. Multivariate nutrient diagnosis of the carrot crop. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 119(3): 420-426.
- PIMIENTA, B. E. 1990. El Nopal Tunero. Universidad de Guadalajara, México. 235 p.
- RAGHUPATHI, H. B.; REDDY, B., M. C.; SRINIVAS, K. 2002. Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in banana. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33: 2131-2143.
- VALDEZ-CEPEDA, R. D.; BLANCO, M. F.; MURILLO, A. B.; MÁRQUEZ, M. M.; MAGALLANES, Q. R.; RUIZ-GARDUÑO, R. R.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; LEDESMA-MARES, J. C.; MACÍAS-RODRÍGUEZ, F. J. 2003. Fertilización química en nopal, pp. 117-136. *In: El Nopal, Alternativa para la Agricultura de Zonas Áridas en el Siglo XXI.* MURILLO, A. B.; TROYO, D. E.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L. (eds.). Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S. C. La Paz, B. C. S. México.
- WALWORTH, J. L.; SUMNER, M. E. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 6: 149-188.