

EL RENDIMIENTO DE FRUTO POR CLADODIO DEPENDE DE SUS ATRIBUTOS FÍSICOS EN *Opuntia ficus-indica* (L.) MILLER VARIEDAD 'ROJO PELÓN'

Ricardo David Valdez-Cepeda^{1,2}; Santiago de Jesús Méndez-Gallegos³; Rafael Magallanes-Quintanar⁴; Dámaris Leopoldina Ojeda-Barrios⁵; Fidel Blanco-Macías^{1*}

¹Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Centro-Norte. Calle Cruz del Sur # 100, Col. Constelación. Apdo. Postal 196. El Orito, Zacatecas, MÉXICO. C.P. 98085.

Correo-e: fiblama63@gmail.com (*Autor para correspondencia)

²Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Matemáticas. Calzada Solidaridad s/n. Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO. CP 98064.

³Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí. Iturbide 73. Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, MÉXICO. CP 78600.

⁴Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica.

Av. Ramón López Velarde # 801. Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO. C.P. 98064.

⁵Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas. Calle Escorza # 900. Chihuahua, Chihuahua, MÉXICO. CP 31300.

RESUMEN

La especie *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller crece en un rango amplio de condiciones ambientales. Esto implica una gran variabilidad de rendimiento y maduración de fruto, entre otros aspectos. El objetivo de este trabajo de investigación fue identificar las dependencias del rendimiento de fruto por cladodio con respecto a la materia fresca o seca de cladodio de fructificación, y a la proporción entre longitud y ancho de cladodios de fructificación. La técnica de curva límite y los datos de 60 cladodios de fructificación terminales de un año de edad y sus 480 frutos de *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón' de 20 árboles de nopal de 6 años de edad distribuidos a una densidad de 625 plantas-ha⁻¹ fueron usados. Muchos de los cladodios de fructificación con 144 g (mínimo) a 964 g (máximo) de materia fresca tuvieron rendimientos de fruto de 409 g o más por cladodio; mientras que la mayoría de los cladodios de fructificación con 14.4 g (mínimo) a 78.5 g (máximo) de materia seca tuvieron rendimientos de fruto de 409 g o más por cladodio. Longitudes de 21.8 cm a 38.4 cm y anchos de cladodio de fructificación de 15.2 cm a 20.8 cm están asociados al 90 % de los vértices correspondientes (los rendimientos de fruto mayores por cladodio). Esos valores pueden ser usados para realizar la poda con el objetivo de asegurar rendimientos grandes con frutos de peso fresco aceptable y tamaño comercial apropiado.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: Cladodios de fructificación de un año de edad, tuna, materia seca, materia fresca, longitud de cladodio, ancho de cladodio.

FRUIT YIELD PER CLADODE DEPENDS ON ITS PHYSICAL ATTRIBUTES IN *Opuntia ficus-indica* (L.) MILLER VARIETY 'ROJO PELÓN'

ABSTRACT

Opuntia ficus-indica (L.) Miller species grows in a wide range of environmental conditions, which implies a great variability in fruit yield and fruit ripening, among other aspects. Therefore, the aim of this research work was to identify the dependences of fruit yield per cladode on fruiting cladode fresh or dry matter, on fruiting cladode length or width, and on the ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width. The boundary-line approach and data from 60 terminal one-year-old fruiting cladodes and their 480 fruits of *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón' from 20 six-year-old trees distributed at a density of 625 plants-ha⁻¹ were used. Most fruiting cladodes with 144 g (minimum) to 964 g (maximum) of fresh matter had fruit yields of 409 g per cladode or even more, whereas most fruiting cladodes with 14.4 g (minimum) to 78.52 g (maximum) of dry matter had fruit yields of 409 g per cladode or even more. Fruiting cladode lengths from ≈21.8 cm to ≈38.4 cm, and fruiting cladode widths from ≈15.2 cm to ≈20.8 cm are linked to 90 % of their corresponding vertex (the estimated highest fruit yield per cladode). These measurements can be used to perform pruning in order to ensure high yields with fruits of acceptable fresh weight and suitable commercial size.

ADDITIONAL KEYWORDS: One-year-old fruiting cladode, cactus pear, dry matter, fresh matter, cladode length, cladode width.

INTRODUCCIÓN

La especie *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller es un cultivo importante en México y en al menos otros 18 países en el mundo. Sus tallos tiernos son usados ampliamente como vegetales para consumo humano y los cladodios maduros son usados de manera frecuente para alimentación animal (Blanco-Macías *et al.*, 2010), especialmente en México; en los otros países, dicha especie es usada principalmente para producción de fruto. Sin embargo, el rango amplio de condiciones ambientales en el cual crece implica una gran variabilidad de rendimiento de fruto y maduración de fruto (Inglese *et al.*, 2002), entre otros aspectos.

La productividad frutal de *Opuntia ficus-indica* es muy variable de país a país (Inglese *et al.*, 2002). También varía a niveles de huerta, planta y cladodio. La poda inadecuada, edad de la planta e interacciones entre frutos en desarrollo, brotes florales o vegetativos y crecimiento productivo pueden contribuir en ese contexto. Por ejemplo, Bowers (1996) señaló que la proporción entre cladodios nuevos y flores iniciadas fue pequeña durante tres años consecutivos, con lo cual se manifestó una gran inversión en reproducción sexual en la especie *Opuntia engelmannii*. Sin embargo, las plantas recuperaron la inversión en cuatro años cuando el número de cladodios superaron, al triplicar, la media de los tres años previos y el número de flores iniciadas fue mucho menor que la media de los tres años (Bowers, 1996). Por consiguiente, periodos de gran inversión en flores o frutos deberían alternar con periodos de gran crecimiento vegetativo.

El rendimiento de fruto y su calidad dependen de factores del árbol, tales como la arquitectura de la planta, posición del cladodio de fructificación dentro de la copa del árbol y características de cladodio. Dichas dependencias han sido exploradas escasamente (García de Cortázar y Nobel, 1992; Inglese *et al.*, 1995). En la experiencia pionera, García de Cortázar y Nobel (1992) determinaron que la fructificación ocurrió cuando el peso seco de cladodio de valor mínimo para un área superficial de un cladodio en particular, referido como 'exceso de peso seco de cladodio', fue mayor a 33 g para *O. ficus-indica* con base en una muestra de 45 cladodios. En otro caso, el valor del exceso de peso seco de cladodio fue de 50 g cuando se determinó al involucrar 35 cladodios de *O. ficus-indica* cultivar 'Gialla' (Inglese *et al.*, 2010). Más recientemente, Valdez-Cepeda *et al.* (2013) señalaron que la fructificación ocurrió cuando el exceso de peso seco de cladodio fue mayor a 14.4 g para *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón' al usar una muestra de 60 cladodios de un año de edad.

Los diferentes excesos de peso seco conocidos pueden ser atribuidos principalmente a que provienen de diferentes genotipos y edades de planta, entre otros aspectos. Sin embargo, aún se desconoce la influencia de otros atributos físicos de cladodio sobre el rendimiento de fruta por cladodio. Por consiguiente, el exceso de peso seco de cladodio podría ser usado para diferenciar genotipos. Entonces, estudiar la

INTRODUCTION

Opuntia ficus-indica (L.) Miller species is an important crop in Mexico and at least 18 other countries around the world. Its tender shoots are widely used for human consumption as vegetables, and mature cladodes are frequently used for animal feed (Blanco-Macías *et al.*, 2010), especially in Mexico; in the other countries, it is mainly used for fruit production. However, the wide range of environmental conditions in which it grows implies a great variability in fruit yield and fruit ripening (Inglese *et al.*, 2002), among other aspects.

Opuntia ficus-indica fruit productivity is extremely variable from country to country (Inglese *et al.*, 2002). It also varies at orchard, plant and cladode levels. Poor pruning practices, plant age, and interactions between developing fruits and flower buds or vegetative versus productive growth may account for this behavior. For instance, Bowers (1996) pointed out that the ratio of new cladodes to initiated flowers was low during three consecutive years, showing a high investment in sexual reproduction for the *Opuntia engelmannii* species. However, the plants recouped this investment in the fourth year when the number of new cladodes was 3 times greater than the mean of the three previous years and the number of initiated flowers was much lower than the 3-year mean (Bowers, 1996). Therefore, periods of high investment in flowers or fruits should alternate with periods of high vegetative growth.

Fruit yield or quality dependence on within-tree factors such as plant architecture, fruiting cladode position within the canopy and cladode characteristics have been poorly explored (García and Nobel, 1992; Inglese *et al.*, 1995). In the pioneer study on this topic, García and Nobel (1992) determined that fruiting occurred when the cladode dry weight above the minimum value for a particular cladode surface area, referred to as 'cladode excess dry weight', exceeded 33 g for *O. ficus-indica* based on a sample of 45 cladodes. In another case, the value of cladode excess dry weight was 50 g in a sample containing 35 cladodes of *O. ficus-indica* cultivar 'Gialla' (Inglese *et al.*, 2010). More recently, Valdez-Cepeda *et al.* (2013) pointed out fruiting occurred when dry weight surpassed 14.4 g for *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón' when using a sample of 60 one-year-old cladodes.

The known different cladode excess dry weights could be mainly attributed to the fact they come from different genotypes and plant age groups, among other aspects. As a result, cladode excess dry weight might be used for differentiating genotypes. However, the influence of other cladode physical attributes on fruit yield per cladode remains unknown. Thus, studying *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón' flowering or fruit production as related to plant and cladode attributes in central Mexico could be interesting. This genotype is strongly becoming an important genotype for fruit production because it has proven to be tolerant of freezing temperatures (Valdez-Cepeda *et al.*, 2001). Therefore, in this

floración y producción de fruta de la especie *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón' y sus relaciones con atributos de planta y cladodios puede ser interesante para el caso de la Región Central de México. En dicha región, este genotipo se está convirtiendo fuertemente en un genotipo importante para la producción de fruto porque se ha comprobado que es tolerante a temperaturas congelantes (Valdez-Cepeda *et al.*, 2001). Por lo tanto, en este trabajo de investigación, el objetivo fue generar conocimiento sobre las dependencias del rendimiento de fruta del peso fresco o seco de cladodio, longitud o ancho de cladodio de fructificación y de la proporción morfométrica entre largo y ancho de dichos cladodios para la variedad 'Rojo Pelón' por medio de la técnica de curva límite.

MATERIALES Y MÉTODOS

Parcela Experimental

Una huerta fue establecida en junio de 2006 en el campo experimental del 'Centro Regional Universitario Centro Norte' de la 'Universidad Autónoma Chapingo' a 22° 44' 49.6" LN, 102° 46' 28.2" LO, y 2 296 msnm. El clima que caracteriza a la región puede ser clasificado como BS1kw(w), el cual corresponde al menos seco de los del tipo estepario seco, con temperatura media anual entre 12 y 18 °C y precipitación media anual de 472 mm. La mayor parte de la precipitación (65 %) ocurre de junio a agosto.

La huerta se estableció con el propósito de propagar la especie *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón'. Veinte cladodios madre fueron usados. Sus estimadores estadísticos básicos fueron los siguientes: longitud de cladodio de 28.5 ± 5.4 cm; y ancho de cladodio de 16.3 ± 2.2 cm. Los 20 árboles considerados tenían estructura en forma de vaso con densidad de 625 plantas-ha⁻¹. Después del establecimiento de la huerta, las malezas fueron removidas a finales de primavera y verano cada año de manera manual. No se realizó fertilización, irrigación ni otras prácticas agronómicas. Cabe mencionar que desde el establecimiento de la huerta hasta desprender los cladodios experimentales, la práctica de poda en los árboles no se realizó.

Datos

Sesenta cladodios terminales de fructificación y 480 frutos de *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón' fueron considerados en este estudio. Todos los cladodios fueron seleccionados de la parte superior de las plantas para asegurar que tuvieran un año de edad. Además, se involucraron cladodios que tuvieron desde uno hasta 15 frutos; cada número repetido cuatro veces, por lo que fueron evaluados 60 cladodios.

Se tuvo especial cuidado de elegir un cladodio de cada punto cardinal de la planta (norte, sur, este y oeste) asociado a cada número de frutos; asimismo, la mayoría de frutos mostraran cambio de color en su cáscara. Por lo anterior,

research work, the aim was to generate knowledge about the fruit yield per cladode dependences on fruiting cladode fresh or dry weight, on fruiting cladode length or width, and on the morphometric ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width for the 'Rojo Pelón' variety by means of the boundary-line approach.

MATERIALS AND METHODS

Experimental plot

An orchard was established in June 2006 in the experimental field of the 'Centro Regional Universitario Centro Norte' of the 'Universidad Autónoma Chapingo' at 22° 44' 49.6" North latitude, 102° 46' 28.2" West longitude, and 2 296 masl, located near Zacatecas City, Mexico. Climate characterizing the region can be classified as BS1kw(w) which corresponds to the least dry of the dry steppe type, with a mean annual temperature ranging between 12 and 18°C and a yearly average precipitation of 472 mm. Most of the precipitation (65 %) occurs from June to August.

The orchard was established in order to propagate *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón'. Twenty mother cladodes were used. Their basic statistics were as follows: 28.5 ± 5.4 cm, cladode length; and 16.3 ± 2.2 cm, cladode width. Thus, there were 20 naturally vase-shaped trees. Within the experimental plot, a density of 625 plants-ha⁻¹ was used. After the orchard establishment, weeds were removed each year in late spring and summer by low tillage. Fertilization, irrigation and other agronomic practices were not performed. It should be mentioned that from the orchard establishment to the detaching of experimental cladodes, the trees were never pruned.

Data

Sixty terminal fruiting cladodes and 480 fruits of *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón' were considered for this study. All cladodes were selected from the uppermost part of the plants to ensure they were one years old. The selection process was based on selecting cladodes having from one to 15 fruits in order to involve four cladodes having each of these numbers of fruits; therefore, we considered 60 cladodes. Special care was applied to have one cladode from each part of the plant (north, south, east and west) associated with each number of fruits, as well as have most of the fruits showing peel color breakage. All 480 fruits were harvested and weighed. All 60 detached cladodes were measured for major length and width, and cleaned with distilled water and immediately weighed. Those actions were performed on August 9 and 10, 2012. Afterwards, all 60 cladodes were cut in slices and dehydrated to constant dry weight in an oven at 75 °C for 36 hours, and then their weights were recorded. It should be mentioned that in our previous work (Valdez-Cepeda *et al.*, 2013), fruiting cladodes' fresh and dry matter levels were involved as independent variables.

un total de 480 frutos fueron cosechados y pesados. En cada uno de los 60 cladodios desprendidos se midió la longitud y el ancho, luego se limpiaron con agua destilada y fueron inmediatamente pesados. Esas actividades fueron realizadas los días 9 y 10 de agosto de 2012. Después, los cladodios fueron cortados en rebanadas y deshidratados hasta peso seco constante en estufa a 75 °C durante 36 horas; luego sus pesos fueron registrados. Merece ser señalado que en nuestro trabajo previo (Valdez-Cepeda *et al.*, 2013), las materias fresca y seca de los cladodios de fructificación fueron involucradas como variables independientes.

Análisis Registrados

Los datos de rendimiento de fruto por cladodio (obtenido al pesar todos los frutos de cada cladodio), las materias fresca y seca por cladodio, así como la longitud y ancho de cladodio fueron capturados en una hoja de cálculo en el programa Microsoft Office Excel. Se estimó la proporción morfométrica de cladodio de fructificación como el cociente entre longitud y ancho. Fueron dos los diagramas de dispersión. Después, las asociaciones posibles entre las materias fresca y seca de los cladodios de fructificación, fue estimada por medio de regresión lineal simple y la asociación lineal entre longitud y ancho de los mismos mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Enseguida, la técnica de curva límite se aplicó, conforme a lo señalado por Evanylo and Sumner (1987), Evanylo (1990) y Valdez-Cepeda *et al.* (2013) para describir las relaciones entre los pares de atributos siguientes:

- Rendimiento de fruto por cladodio y materia fresca de cladodio de fructificación.
- Rendimiento de fruto por cladodio y materia seca de cladodio de fructificación.
- Rendimiento de fruto por cladodio y longitud de cladodio de fructificación.
- Rendimiento de fruto por cladodio y ancho de cladodio de fructificación.
- Rendimiento de fruto por cladodio y la proporción morfométrica entre largo y ancho de cladodio de fructificación.

La curva límite es formada cuando todos los valores de dos variables se grafican y una línea que encierra o envuelve a los puntos es establecida (Michael *et al.*, 1985). La línea representa el efecto limitante de la variable independiente (Lark, 1997; Webb, 1972), entonces se supone que todos los valores situados debajo de ella son resultado de la influencia de alguna otra variable independiente o de una combinación de variables que están limitando a la variable dependiente (Webb, 1972; Hinckley *et al.*, 1978).

El primer paso consistió en graficar los datos. Luego, cada relación bivariada fue usada con los propósitos de analizar el patrón de distribución, determinar su uso conveniente y potencial y remover valores extraños obvios. Es común que

Statistical analyses

Data of fruit yield per cladode (obtained by weighing all cladode fruits), fruiting cladode fresh and dry matter, and cladode length and width were captured in a spreadsheet with Microsoft Office Excel Software (Anonymous, 2010). The database was then used for estimating the morphometric ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width, and for making scatter diagrams. Afterwards, possible associations between fruiting cladode fresh matter and fruiting cladode dry matter, and between fruiting cladode length and fruiting cladode width were performed through linear regression analysis and Pearson correlation coefficient, respectively. Later, the boundary-line approach was applied, as pointed out by Evanylo and Sumner (1987), Evanylo (1990), and Valdez-Cepeda *et al.* (2013) to describe the following relationships:

- Fruit yield per cladode against fruiting cladode fresh matter.
- Fruit yield per cladode against fruiting cladode dry matter.
- Fruit yield per cladode against fruiting cladode length.
- Fruit yield per cladode against fruiting cladode width.
- Fruit yield per cladode against the morphometric ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width.

The boundary-line is formed when all values for two variables are plotted and a line enclosing these points is established (Michael *et al.*, 1985). The line represents the limiting effect of the independent variable on the dependent variable (Lark, 1997; Webb, 1972), and thus it is assumed that all values below it result from the influence of another independent variable or a combination of variables that are limiting the dependent variable (Webb, 1972; Hinckley *et al.*, 1978).

The first step consisted of plotting data. Then, each bivariate relation was used in order to analyze the distribution pattern, to determine its suitability and potential use, and to remove obvious outliers. Commonly, observations positioned within tails defined by $\alpha=0.025$ in each distribution are considered as outliers and then removed. However, there was no need to carry out this action in any of the cases of the present report.

The second step was the selection of the points located on the upper limit of the scatter diagram. It was performed by dividing the independent variable's range into classes and selecting only the highest response point for each interval. The rationale for taking into account representative points of classes was based on two criteria:

- a) to use at least five representative observations to develop the model in order to limit the selection of points to the superior boundary of scattered points, and
- b) to increase the number of observations (≥ 5) when possible. It is advisable to maximize the likelihood of develop-

las observaciones dentro de las colas definidas por $\alpha = 0.025$ en cada distribución sean consideradas como valores extraños y eliminados. Sin embargo, tal acción fue innecesaria en todos los casos del presente estudio.

El segundo paso fue la selección de los puntos localizados en la parte superior de los diagramas de dispersión. Ello se realizó al dividir el rango de las variables independientes en clases y seleccionar solo al punto respuesta mayor en cada intervalo. El aspecto racional para considerar los puntos representativos de las clases estuvo basado en dos criterios:

a) usar al menos cinco observaciones representativas para desarrollar el modelo con el objetivo de limitar la selección de puntos al límite superior del diagrama de dispersión de puntos, y

b) incrementar el número de observaciones (≥ 5) cuando fuera posible. Es aconsejable maximizar la probabilidad de desarrollar modelos estadísticos significativos. La elección de un número de puntos limitantes, los cuales serán usados para estimar la curva límite en cada diagrama de dispersión, representa los compromisos de contar con grupos de tamaño grande y un gran número de puntos limitantes (Schmidt *et al.*, 2000). Esas condiciones son prerequisites para una definición confiable de puntos límite y la estimación de curvas límite, respectivamente. Como resultado, al menos cinco puntos fueron considerados al tomar en cuenta la distribución de todos los puntos en cada diagrama de dispersión. Por ejemplo, la Figura 2a muestra a las nueve observaciones representativas que relacionan el rendimiento de fruto y la materia fresca de cladodios de fructificación de *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón'.

El tercer paso consistió en ajustar una función de segundo grado, como en el caso de la Figura 2a para el rendimiento de fruto *versus* materia fresca del cladodio de fructificación. Después, la respuesta máxima es estimada al calcular el valor correspondiente a una pendiente cero para la función de segundo grado (ver el vértice en las Figuras 2ab, 3abc).

RESULTADOS

La base de datos corresponde a 60 cladodios terminales de fructificación de un año de edad y sus 480 frutos de *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón'. Todos los cladodios y frutos fueron desprendidos de 20 árboles de 6 años de edad distribuidos a una densidad de 625 plantas·ha⁻¹. Esto significa que ambas muestras (de cladodios y frutos) son grandes y, por consiguiente, los resultados pueden ser considerados robustos estadísticamente. Los estimadores estadísticos básicos de los seis atributos se muestran en el Cuadro 1.

Los análisis estadísticos exploratorios permitieron encontrar algunos aspectos interesantes como se explican enseguida. Como se esperaba, una relación lineal fuerte ($y = 11.652x$; $R^2 = 0.8896$) fue evidenciada cuando la materia fresca de

ing statistically significant models. The choice of a number of boundary points, which are used to estimate a boundary-line in each scatter diagram, represents a compromise between the two aims of big group sizes and a high number of boundary points (Schmidt *et al.*, 2000). These conditions are prerequisites for a reliable definition of boundary points and estimation of boundary-lines, respectively. As a result, at least five points were considered by taking into account the distribution of all points in each scatter diagram. For instance, Figure 2a shows the nine representative observations relating fruit yield and cladode fresh matter of *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón'.

The third step consisted of fitting a second-degree function, as in Figure 2a for the fruit yield against fruiting cladode fresh matter case. Then, the maximum response is estimated by calculating the value corresponding to a slope of zero for the second-degree function (see vertex at Figures 2ab, 3abc).

RESULTS

Our database corresponds to 60 terminal fruiting one-year-old cladodes and their 480 fruits of *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón'. All cladodes and fruits were detached from twenty 6-year-old trees distributed at a density of 625 plants·ha⁻¹. This means that both samples (cladodes and fruits) are big and therefore the results could be considered as statistically robust. The main basic statistics of the six attributes are shown in Table 1.

Explorative statistical analyses allowed us to find some interesting aspects as pointed out below. As expected, a strong linear relationship ($y = 11.652x$; $R^2 = 0.8896$) was evidenced when cladode fresh matter was considered dependent on cladode dry matter (Figure 1a). It suggests each g of dry matter should store 11.65 g of water. On the other hand, a strong association between cladode length and cladode width was identified but at a glance it appears to be nonlinear (Figure 1b) and deserves an explanation; however, it is outside of the scope of this contribution. In addition, fruit yield per cladode, and cladode fresh and dry weights showed high variability (CV=50.42, CV=28.71 and CV=25.69, respectively), whereas cladode length and width variability (CV=17.48 and CV=12.14) could be considered as moderately high (Table 1). Variability is an important aspect in order to attain our objective. Thus, this database can be used in that sense.

Fruit yield per cladode versus fruiting cladode fresh matter

The fruit yield per cladode dependence on fruiting cladode fresh matter was clearly evidenced (Figure 2a). Most of the data points are grouped at the bottom, that is, at low fruit yield. High fruit yields per cladode were only rarely measured across each frequency class considered; thus, selection of representative points for estimating the quadratic function to define the boundary line was simple. Therefore, choosing points at the upper edge of the data body was easy; then, a re-

CUADRO 1. Estimadores estadísticos básico de los atributos de cladodio de fructificación de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variedad ‘Rojo Pelón’ (n=60 cladodios).

TABLE 1. Basic statistics of fruiting cladode attributes of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variety ‘Rojo Pelón’ (n=60 cladodes).

Atributo / Attribute	Media / Mean	Mínimo / Minimum	Máximo / Maximum	Desviación Estándar / Standard deviation	CV
Rendimiento de fruto por cladodio (g) / Fruit yield per cladode (g)	583.58	80.00	1186.00	294.26	50.42
Materia fresca de cladodio de fructificación (g) / Fruiting cladode fresh matter (g)	566.08	144.00	964.00	162.51	28.71
Materia seca de cladodio de fructificación (g) / Fruiting cladode dry matter (g)	48.75	14.40	78.52	12.52	25.69
Longitud de cladodio de fructificación (cm) / Fruiting cladode length (cm)	28.99	16.00	40.00	5.07	17.48
Ancho de cladodio de fructificación (cm) / Fruiting cladode width (cm)	16.68	11.00	22.00	2.02	12.14
Proporción entre longitud y ancho de cladodio de fructificación / Ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width	1.739	1.05	2.13	0.23	13.42

CV = Coeficiente de variación.

CV = Coefficient of variation.

cladodio fue considerada como variable dependiente de la materia seca de cladodio (Figure 1a). Ello sugiere que cada g de materia seca puede almacenar 11.65 g de agua.

Por otra parte, una asociación fuerte entre longitud y ancho de cladodio fue identificada pero al observar acuciosamente parece ser no lineal (Figure 1b) y merece una explicación; sin embargo, tal relación carece de interés en esta contribución. Además, el rendimiento de fruto por cladodio y los pesos de materia fresca y seca de cladodio mostraron gran variabilidad (CV=50.42, CV=28.71 y CV=25.69, respectivamente), mientras que la variabilidad de longitud y ancho de cladodio (CV=17.4 y CV=12.1, respectivamente) pueden ser consideradas como moderadamente grande (Cuadro 1). La variabilidad es un aspecto importante con el propósito de lograr el objetivo del presente estudio. Por lo tanto, esta base de datos puede ser usada en ese sentido.

Rendimiento de fruto por cladodio versus materia fresca de cladodio de fructificación

El rendimiento de fruto por cladodio depende de la materia fresca de cladodio de fructificación (Figura 2a). La mayoría de los puntos se agruparon en la parte inferior del diagrama de dispersión, es decir, con rendimiento de fruto pequeño. Los rendimientos de fruto grandes fueron escasos en cada clase de frecuencia considerada; entonces, la selección de puntos representativos para estimar la función cuadrática y definir la curva límite fue sencilla; después, fue detectada

relationship between fruit yield per cladode and fruiting cladode fresh matter for the ‘Rojo Pelón’ variety was observed.

What is remarkable is that the minimum fruiting cladode fresh matter was 144 g (Table 1 and Figure 2a). This means there were no cladodes producing at least one fruit if their fresh matter did not reach this value. In addition, it was noted that after the maximum fruiting cladode fresh matter (964 g) was reached, fruit yield diminished drastically. Thus, cladodes having from 144 g to 964 g of fresh matter produced fruit yields with ≥ 80 g to 1186 g. Most notably, the estimated quadratic function ($y = -0.0035x^2 + 4.122x - 148.58$; $R^2 = 0.715$) suggests that fruiting cladodes with ≈ 558.9 g of fresh matter may be able to support high fruit yields (≈ 1065.3 g) per cladode in *O. ficus-indica* variety ‘Rojo Pelón’.

Fruit yield per cladode versus fruiting cladode dry matter

The scatter plot of fruit yield versus fruiting cladode dry matter (Figure 2b) also shows that most of the data points are clustered at the bottom, that is, at low fruit yield per cladode. Thus, high fruit yields were only scarcely measured across each frequency class considered, although the selected points did not allow us to estimate a function with decaying right side at the same level as the extreme left (i.e. at ≈ 409 g of fruit yield per cladode). Whatever this result means, the estimated quadratic function ($y = -0.4652x^2 + 48.823x - 236.52$; $R^2 = 0.815$) implies that fruiting cladodes with ≈ 52.5 g of dry matter are able to produce high

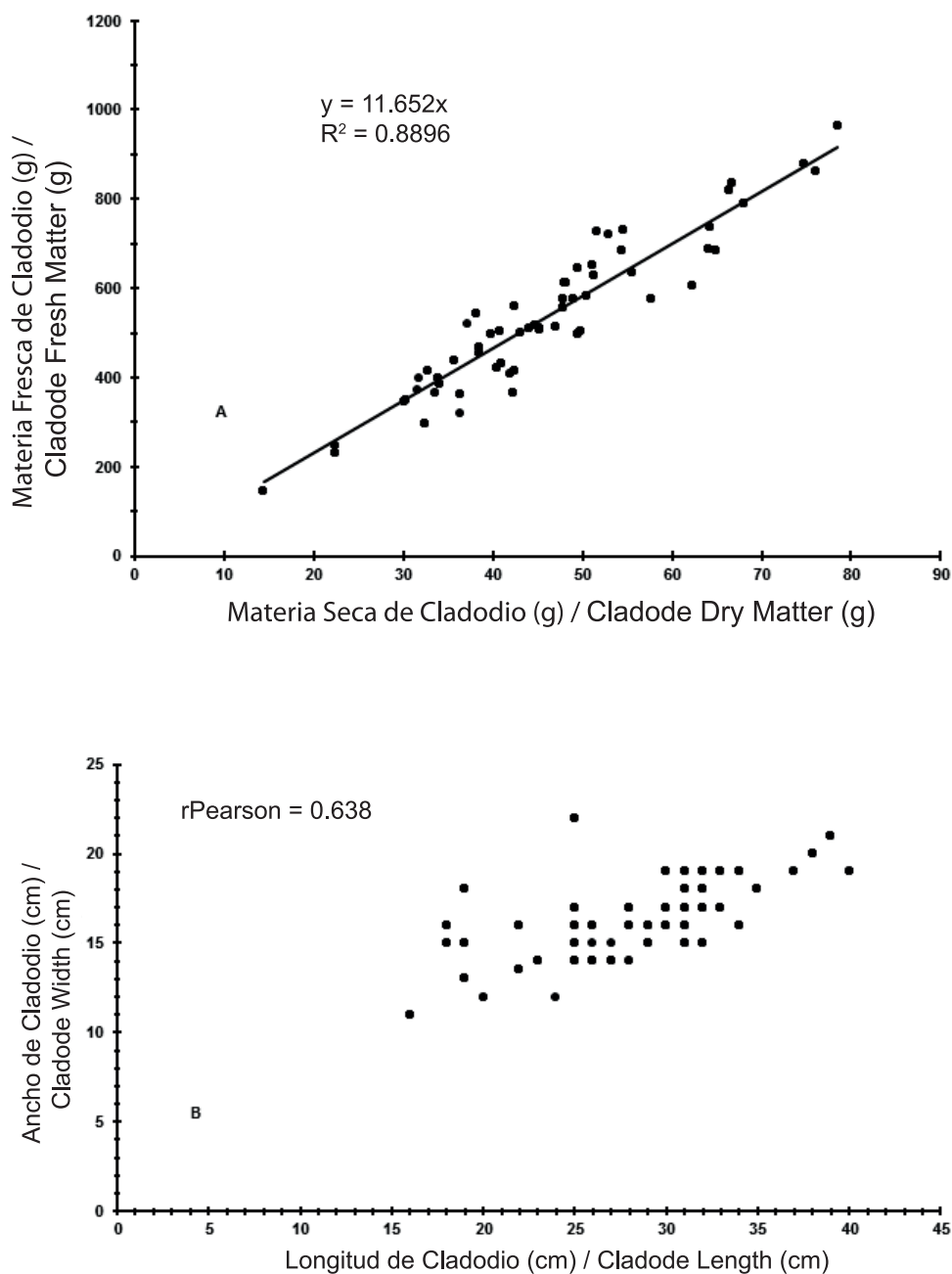


FIGURA 1. Las relaciones entre materia fresca y seca de cladodio de fructificación (A), y entre longitud y ancho de fructificación (B) para *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variedad 'Rojo Pelón'.

FIGURE 1. The relationships between fruiting cladode fresh matter and fruiting cladode dry matter (A), and fruiting cladode length and fruiting cladode width (B) for *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variety 'Rojo Pelón'.

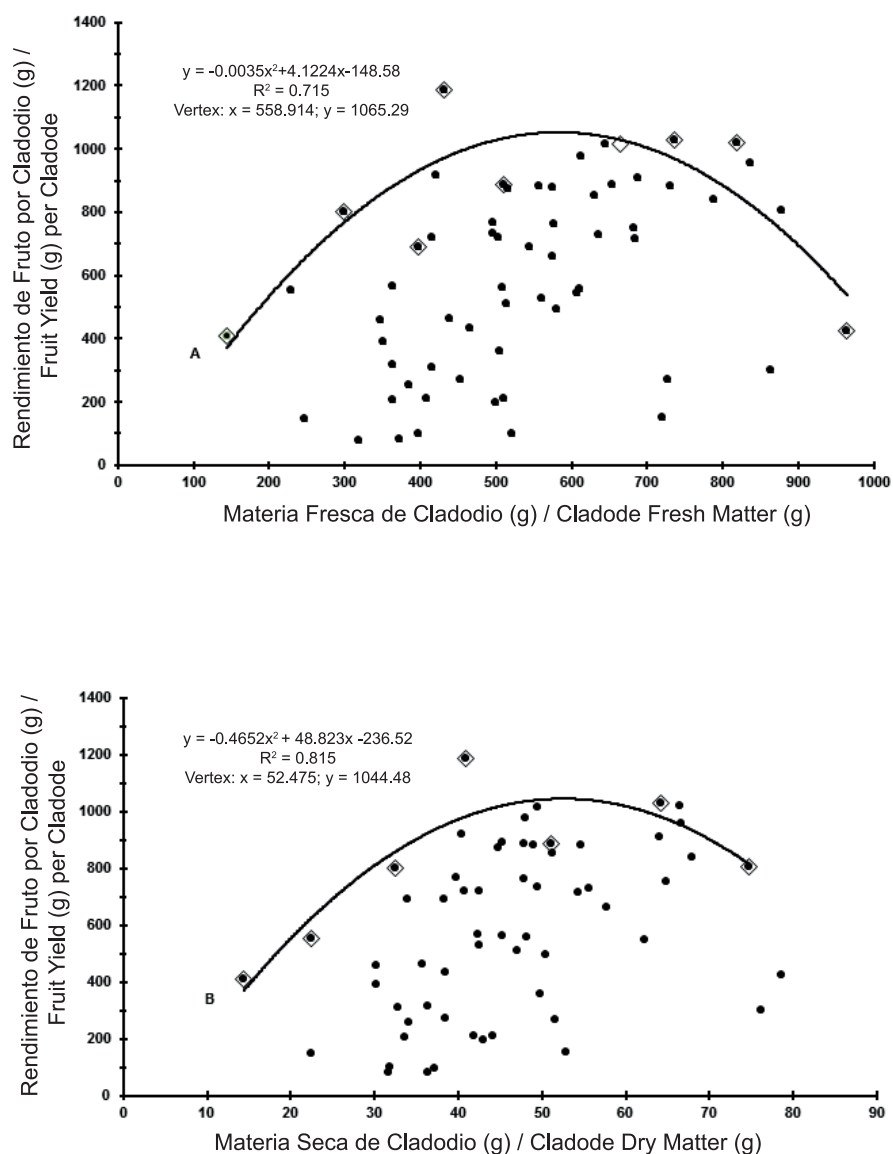


FIGURA 2. Las relaciones entre rendimiento de fruto por cladodio y material fresco (A) o materia seca de cladodio de fructificación (B) para *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variedad 'Rojo Pelón' mostrando las curvas límite descritas por funciones de Segundo grado estimadas al usar los puntos marcado con diamantes (◊).

FIGURE 2. The relationships between fruit yield per cladode and fruiting cladode fresh (A) or dry matter (B) for *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variety 'Rojo Pelón' showing the boundary-lines described by second-degree functions estimated using points marked with diamonds (◊).

una relación entre rendimiento de fruto por cladodio y la materia fresca de cladodio de fructificación para la variedad 'Rojo Pelón'.

Lo notable es que la materia fresca mínima de cladodio de fructificación fue de 144 g (Cuadro 1 y Figura 2); ello significa que no hubo cladodios que produjeran al menos un

fruit yields (≈ 1044.5 g) per cladode in *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón'.

Fruit yield per cladode versus fruiting cladode length

The fruit yield per cladode dependence on fruiting cladode length was determined (Figure 3a). In this case as in the oth-

fruto si su materia fresca fue al menos dicho valor. Además, fue notorio que con valores mayores del máximo de materia fresca de cladodio de fructificación (964 g), el rendimiento de fruto disminuyó drásticamente. Por consiguiente, cladodios de 144 g a 964 g de materia fresca produjeron rendimientos de fruto entre 80 g y 1186 g. Lo más notable fue que la función cuadrática estimada ($y = -0.0035x^2 + 4.122x - 148.58$; $R^2 = 0.715$) sugiere que los cladodios de fructificación con ≈ 558.9 g de materia fresca pueden ser capaces de soportar rendimientos grandes de fruto (≈ 1065.3 g) por cladodio en *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón'.

Rendimiento de fruto por cladodio versus materia seca de cladodio de fructificación

El diagrama de dispersión de rendimiento de fruto versus materia seca de cladodio de fructificación (Figura 2b) también muestra que los puntos se agrupan en la parte inferior, es decir, corresponden a rendimientos pequeños de fruto. Entonces, los rendimientos grandes de fruto fueron medidos escasamente en cada una de las clases de frecuencia consideradas; aunque los puntos seleccionados no permitieron estimar una función decadente en el lado derecho al mismo nivel que en el extremo izquierdo (i.e. ≈ 409 g de rendimiento de fruto por cladodio). Sin considerar lo que este resultado signifique, la función cuadrática estimada ($y = -0.4652x^2 + 48.823x - 236.52$; $R^2 = 0.815$) implica que los cladodios de fructificación con ≈ 52.5 g de materia seca pueden ser capaces de producir rendimientos grandes de fruto (≈ 1044.5 g) por cladodio en *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón'.

Rendimiento de fruto por cladodio versus longitud de cladodio de fructificación

El rendimiento de fruto por cladodio depende de la longitud de cladodio de fructificación (Figura 3a). En este caso como en los otros, la mayoría de los puntos se agrupan en la parte inferior en el diagrama de dispersión, es decir, corresponden a rendimientos pequeños de fruto por cladodio. De la misma forma que en el caso de materia seca de cladodio de fructificación, los puntos seleccionados no permitieron estimar una función decadente en el lado derecho al mismo nivel que en el extremo izquierdo (i.e. 800 g rendimiento de fruto); sin embargo, el componente cuadrático fue también evidente ($y = -1.5044x^2 + 90.537x - 321.69$; $R^2 = 0.36$). Así, los cladodios de fructificación con longitud ≈ 30.1 cm pueden ser capaces de soportar un rendimiento máximo de fruta (asociado al vértice) (≈ 1040.5 g) por cladodio. Además, los cladodios de fructificación con entre ≈ 21.8 cm y ≈ 38.4 cm de longitud (asociados al 90 % del rendimiento mayor de fruto registrado por cladodio) deben ser capaces de producir al menos 936.4 g de fruto.

Rendimiento de fruto por cladodio versus ancho de cladodio de fructificación

El rendimiento de fruto por cladodio depende del ancho de cladodio de fructificación (Figura 3b). En este caso como en

ers, most of the data points are grouped at the bottom, that is, at low fruit yields per cladode. As in the fruiting cladode dry matter case, the selected points did not allow us to estimate a function with decaying right side at the same level as the extreme left (i.e. at 800 g fruit yield); however, the quadratic component was also evident ($y = -1.5044x^2 + 90.537x - 321.69$; $R^2 = 0.36$). Thus, fruiting cladodes with ≈ 30.1 cm length may be strongly able to support the vertex fruit yield (≈ 1040.5 g) per cladode. In addition, individual fruiting cladodes having between ≈ 21.8 cm and ≈ 38.4 cm in length (linked to 90 % of the estimated highest fruit yield per cladode, ≈ 1040.5 g) should be able to yield at least 936.4 g.

Fruit yield per cladode versus fruiting cladode width

The fruit yield per cladode dependence on fruiting cladode width was identified (Figure 3b). In this case as in the previous one, most of the data points are clustered at the bottom, that is, at low fruit yields per cladode. In the same way as in the fruiting cladode dry matter and length cases, the selected points did not allow us to estimate a function with decaying right side at the same level as the extreme left (i.e. at 400 g fruit yield). Nonetheless, the quadratic component was much more evident than in the fresh and dry matter, and length cases. As a result, the highest fruit yield per cladode of the equation is with coordinates $y = 18.03$ g and $x = 1082.81$ cm. In addition, it is expected that fruiting cladodes with widths from ≈ 15.2 cm to ≈ 20.8 cm are able to support fruit yields of at least ≈ 974.5 g (90 % of the vertex) each.

Fruit yield per cladode versus the ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width

The fruit yield per cladode dependence on the fruiting cladode's morphometric index (i.e. the ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width) was evidenced (Figure 3c). In this case as in the previous one, most of the data points are grouped at the bottom, that is, at low fruit yields per cladode. In the same way as in the fruiting cladode fresh matter case, the selected points allowed us to estimate a function with decaying right side at the same level as the extreme left (i.e. at ≈ 800 g of fruit yield per cladode). It is worth mentioning that we did not involve fruiting cladodes having ratio values ≈ 1.3 located near the evidenced boundary-line, which could be representative points of the second class because we did not actually find them within the experimental orchard. Regardless of this drawback, the quadratic component was much more evident than in the cladode fresh matter and cladode length cases. Notably, the estimated fruit yield (≈ 1094 g) per cladode at the vertex appears to be linked to a fruiting cladode's morphometric index equal to 1.65.

DISCUSSION

Fruiting cladode fresh matter increased linearly with fruiting cladode dry matter (Figure 1), indicating a strong de-

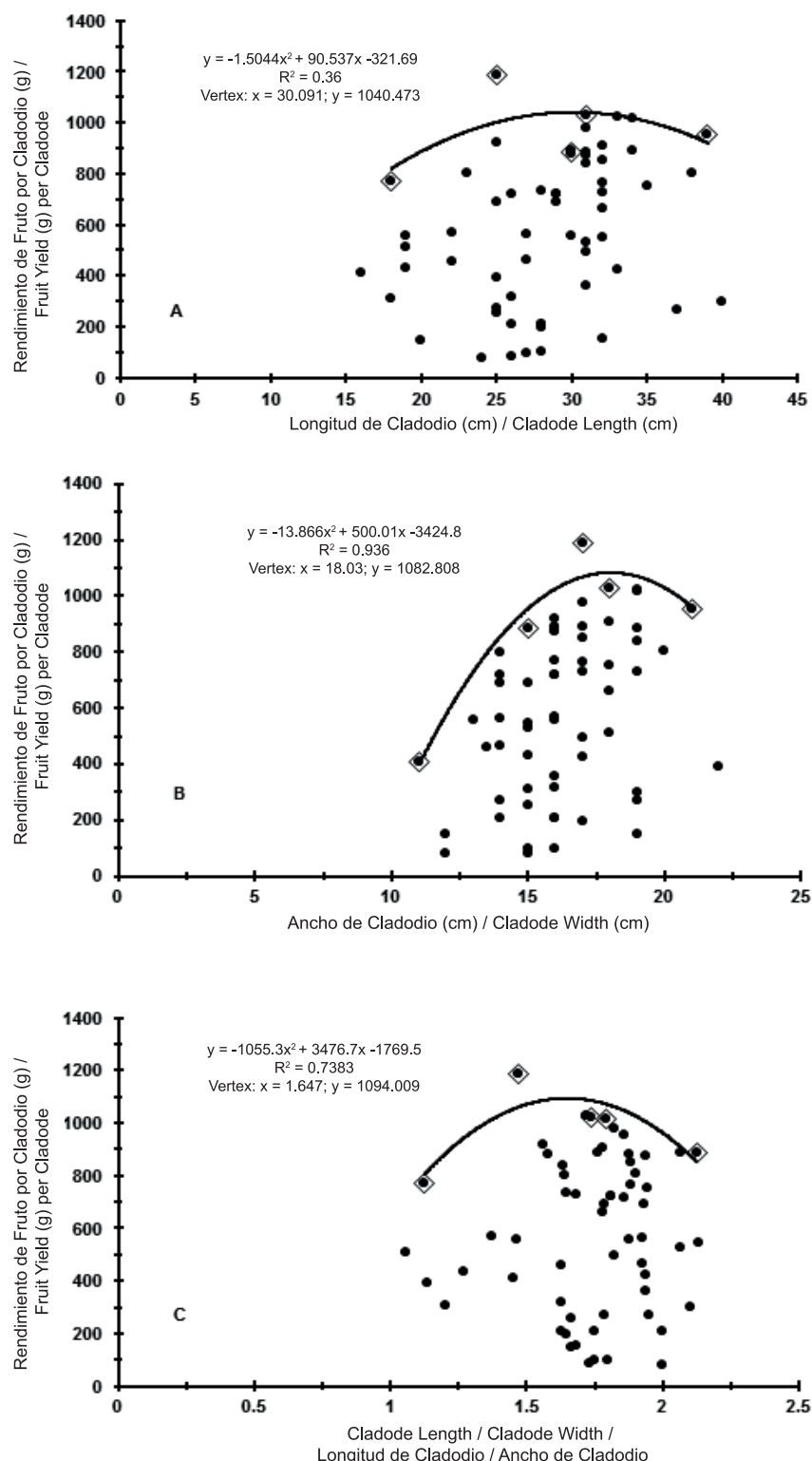


FIGURA 3. Las relaciones entre rendimiento de fruto por cladodio y longitud de cladodio de fructificación (A), ancho de cladodio fructificación (B) o proporción morfométrica dada por la longitud y el ancho (C) de cladodio de fructificación para *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variedad 'Rojo Pelón' mostrando las curvas límite descritas por funciones de Segundo grado estimadas al usar los puntos marcado con diamantes (◊).

FIGURE 3. The relationships between fruit yield per cladode and fruiting cladode length (A), width (B) or morphometric ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width (C) for *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variety 'Rojo Pelón' showing the boundary-lines described by second-degree functions estimated using points marked with diamonds (◊).

los previos, la mayoría de los datos se agrupan en la parte inferior del diagrama de dispersión, es decir, se asocian a rendimientos pequeños de fruto por cladodio. De la misma manera que en los casos de materia seca y longitud de cladodio de fructificación, los puntos seleccionados no permitieron estimar una función decadente en el lado derecho al mismo nivel que en el extremo izquierdo (*i.e.* 400 g de rendimiento de fruto). No obstante, el componente cuadrático fue mucho más evidente que en los casos de materia fresca y seca. Como resultado, el rendimiento máximo estimado con la ecuación se vincula a las coordenadas $y = 18.03$ g y $x = 1082.81$ cm. Además, se espera que cada uno de los cladodios de fructificación con anchos de ≈ 15.2 cm a ≈ 20.8 cm puedan ser capaces de producir rendimientos de fruto de al menos ≈ 974.5 g (90 % del vértice).

Rendimiento de fruto por cladodio *versus* la proporción entre longitud y ancho de cladodio de fructificación

El rendimiento de fruto por cladodio depende del índice morfométrico de los cladodios de fructificación (*i.e.* la proporción de longitud y ancho de cladodio de fructificación, Figura 3c). En este caso como en los previos, la mayoría de los puntos se agruparon en la parte inferior del diagrama de dispersión, es decir, corresponden a rendimientos pequeños de fruto por cladodio. De la misma manera que en el caso de materia fresca de cladodio de fructificación, los puntos seleccionados permitieron estimar una función decadente en el lado derecho del diagrama de dispersión al mismo nivel que en el extremo izquierdo (*i.e.* at ≈ 800 g de rendimiento de fruto por cladodio). Merece ser mencionado que no se involucraron datos de cladodios de fructificación con valores (de esta proporción) aproximados a 1.3 y localizados cerca de la curva límite evidenciada, ellos podrían ser puntos representativos de la clase segunda porque en realidad no se apreciaron dentro de la huerta experimental. Sin considerar este inconveniente, el componente cuadrático fue mucho más evidente que en los casos de materia fresca y longitud de cladodios de fructificación. De manera notoria, el rendimiento de fruto por cladodio (≈ 1094 g) estimado como vértice esta asociado a un índice morfométrico de cladodio de fructificación igual a 1.65.

DISCUSIÓN

La materia fresca de cladodio de fructificación se incrementó linealmente conforme la materia seca de cladodio de fructificación aumentó (Figura 1) lo cual indica una dependencia fuerte. De hecho, el peso seco y fruto se incrementó conforme el peso del cladodio, el cual está relacionado estrechamente con la absorción de carbono por el cladodio y, en última instancia, con la disponibilidad de luz (Nobel y Bobich, 2002). Sin embargo, la relación lineal positiva evidenciada (Figura 1) no implica que el rendimiento de fruto por cladodio se incremente como lo hacen las materias porque los valores mínimo y máximo de materia seca de cladodios de fructificación capaces de producir frutos han

pendence. In fact, fruit dry weight and total soluble solid content increased with cladode dry weight, which is closely related to cladode carbon uptake and, ultimately, to light availability (Nobel and Bobich, 2002). However, the identified positive linear relationship (Figure 1) does not imply fruit yield per cladode increases as both matters do because fruiting cladode minimum and maximum dry matter for fruit production have been identified for *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón' (Valdez-Cepeda *et al.*, 2013).

On the other hand, the evidenced strong association between fruiting cladode length and fruiting cladode width was identified through a value of r Pearson = 0.638; however, it appears to be nonlinear (Figure 1b). *A priori*, we have no explanation for this phenomenon. Therefore, it is advisable to study the dynamic of the ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width as well as to increase the database to find an appropriate explanation.

In *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón', fruit yield occurred on cladodes with fresh and dry matter weights surpassing 144 g and 14.4 g, respectively (Table 1, and Figures 2ab). In this context, prior studies have highlighted the fact that fructification occurs when the cladode dry matter above the minimum value for a particular cladode surface area, referred to as 'cladode excess dry weight', exceeded 33 g for *O. ficus-indica* (García and Nobel, 1992), and 50 g for *O. ficus-indica* cultivar 'Gialla' (Inglese *et al.*, 2010). Clearly, the cladode excess dry matter value of our study case (14.4 g) is much lower than the values estimated by García and Nobel (1992) and Inglese *et al.* (2010). This discrepancy could be because they correspond to different environmental conditions, plant age, plant density (Inglese *et al.*, 2010) and the genotype under study, among other factors.

The evidenced dependence of fructification on fruiting cladode excess dry matter has a reasonable explanation. One-year-old fruiting cladodes are strong sinks during the fruit sigmoidal growth period that occurs during the first 4 to 5 weeks (Inglese *et al.*, 1999). At this stage, they switch to linear growth in terms of dry-weight accumulation, and change from being sinks to sources of carbohydrates (Luo and Nobel, 1993). That is why the sink demand to support growth of fruits and newly initiated daughter cladodes involves a substantial flow of stored carbohydrates from basal cladodes (Luo and Nobel, 1993; Inglese *et al.*, 1994b). As a result, a strong competition between fruits and new cladodes for assimilates can occur. Nonetheless, in this study, the 60 fruiting cladodes used did not produce new cladodes, so undoubtedly competition between fruits and vegetative growth for assimilates was nil.

Furthermore, our results provide compelling evidence about decaying trends of fruit yield per cladode above determined quantities of cladode fresh or dry matter. For instance, above ≈ 818 g and ≈ 66 g of cladode excess fresh and dry matter, respectively, the fruit yield per cladode decreased (Figures

sido identificados para *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón' (Valdez-Cepeda et al., 2013).

Por otra parte, la asociación fuerte evidenciada entre la longitud y ancho de cladodio de fructificación fue identificada mediante un valor de la correlación de Pearson = 0.638, sin embargo, parece ser no lineal (Figura 1b). *A priori*, una explicación sobre este fenómeno se desconoce. Por lo tanto, es conveniente estudiar la dinámica de la proporción entre longitud y ancho de cladodio de fructificación así como incrementar la base de datos con el fin de encontrar una explicación apropiada.

En *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón', el rendimiento de fruto ocurrió en cladodios con materias fresca y seca mayores a 144 g y 14.4 g, respectivamente (Cuadro 1, y Figuras 2ab). En este contexto, trabajos previos resaltaron que la fructificación ocurre cuando la materia seca de cladodio mayor al valor mínimo para una área superficial de un cladodio en particular, referido como 'exceso de peso seco de cladodio', excede 33 g para *O. ficus-indica* (García de Cortázar y Nobel, 1992), y 50 g para *O. ficus-indica* cultivar 'Gialla' (Inglese et al., 2010). Claramente, el valor del exceso de materia seca del cladodio de este caso de estudio (14.4 g) es mucho menor que los valores estimado por García de Cortázar y Nobel (1992) e Inglese et al. (2010). Esta discrepancia puede deberse a que las experiencias corresponden a diferentes condiciones ambientales, edad de planta y densidad de plantación (Inglese et al., 2010) y al genotipo en estudio, entre otros factores.

La fructificación depende del exceso de materia seca de cladodio de fructificación. Al respecto hay una explicación razonable. Los cladodios de fructificación de un año de edad conforman un sistema conductor durante el periodo sigmoide de crecimiento del fruto que ocurre las primeras 4 a 5 semanas (Inglese et al., 1999). En esta etapa, los cladodios suspenden el crecimiento lineal en términos de acumulación de peso seco, y cambian de ser tejidos conductores a fuentes de carbohidratos (Luo y Nobel, 1993). Por eso es que la demanda como conductores para soportar el crecimiento de los frutos y los cladodios nuevos involucran un flujo sustancial de carbohidratos almacenados desde los cladodios basales (Luo y Nobel, 1993; Inglese et al., 1994b). Como resultado, una fuerte competencia, entre frutos y cladodios nuevos, por los asimilados puede ocurrir. No obstante, en este estudio, los 60 cladodios de fructificación usados no produjeron cladodios nuevos, así que seguramente la competencia entre frutos y el crecimiento vegetativo por los asimilados fue nula.

Asimismo, los resultados representan evidencia convincente acerca de las tendencias decadentes del rendimiento de fruto por cladodio mayores a cantidades determinadas de materia fresca y seca de cladodio de fructificación. Por ejemplo, a valores mayores a ≈ 818 g y ≈ 66 g de excesos de materia fresca y seca de cladodio, respectivamente, el rendi-

2ab). Both decaying trends agree with that reported by García and Nobel (1992) who consigned a value of ≈ 100 g of excess dry weight per cladode. The difference between these two excess dry matter values (≈ 66 g and ≈ 100 g) is striking. It could be linked mainly to the fact that the García and Nobel (1992) study involved cladodes that had undergone appreciable secondary growth and had lost the capability for producing fruits, whereas we only used terminal one-year-old fruiting cladodes without vegetative growth.

Indeed, our findings extend those of García and Nobel (1992) and Inglese et al. (2010), confirming that it is possible to estimate minimum and maximum fruiting cladode excess fresh or dry matter levels, in terms of ranges at which fruit yield per cladode occurs. For example, in our study, most fruiting cladodes with ≈ 144 g (minimum) to ≈ 964 g (maximum) of fresh matter had fruit yields of ≈ 409 g per cladode or even more (Figure 2a). In addition, most fruiting cladodes with ≈ 14.4 g (minimum) to ≈ 78.52 g (maximum) of dry matter had fruit yields of ≈ 409 g per cladode or even more (Figure 2b).

Fruiting cladode excess fresh or dry matter required for producing fruit is an important factor in order to avoid high variation between productivity levels in successive years, particularly in plants without water stress or other limiting fruit yield factors. It provides a convenient index for predicting which cladodes will produce fruit (García and Nobel, 1992). Thus, it can be manipulated through pruning.

Pruning based on these principles is justified because it is known that flowers and cladodes appear simultaneously in spring, the flowers occurring mostly at the crown edge of terminal one-year-old cladodes, with the new cladodes usually developing on two-year-old or even older cladodes (Inglese et al., 1994a). However, to estimate fruiting cladode's fresh or dry matter under field conditions and during pruning is not a simple task. Consequently, it is preferable to use cladode size measurements in this context for practical reasons as explained in the following paragraphs.

The estimated quadratic function for fruit yield per cladode against fruiting cladode length indicates cladodes with ≈ 21.8 cm to ≈ 38.4 cm length correspond to 90 % of the fruit yield linked to the vertex ($x = 30.1$ cm and $y = 1040.5$ g, Figure 3a). Thus, fruiting cladodes having lengths within this range may increase the probability of having fruit yields per cladode of 936.4 g. In the case of the quadratic function for fruit yield per cladode against fruiting cladode width, the range defined by 90 % of the fruit yield joined to the vertex ($x = 16.97$ cm and $y = 1384.4$ g, Figure 3b) is supported by fruiting cladodes with ≈ 15.2 cm to ≈ 20.8 cm width. Thus, fruiting cladodes having widths within that range could increase the probability of having 974.5 g of fruit yield per cladode.

It is widely known that pruning should be carried out to attain the proper balance between cladodes for fruit produc-

miento de fruto por cladodio disminuye (Figuras 2ab). Ambas tendencias decadentes coinciden con lo reportado por García de Cortázar y Nobel (1992), quienes consignaron un valor de ≈ 100 g of exceso de materia seca por cladodio. La diferencia entre esos dos valores de exceso de materia seca (≈ 66 g and ≈ 100 g) es importante. Esta discrepancia puede estar asociada principalmente a que García de Cortázar y Nobel (1992) involucraron cladodios que presentaron crecimiento secundario apreciable y perdieron la capacidad de producir frutos, mientras que nosotros usamos solo cladodios terminales de fructificación de un año de edad sin crecimiento vegetativo.

Nuestros hallazgos amplían los de García de Cortázar y Nobel (1992) e Inglese *et al.* (2010) y confirman que es posible estimar niveles de exceso de materia fresca o seca de cladodio de fructificación, en términos de rangos a los cuales el rendimiento de fruto por cladodio ocurre. Por ejemplo, en este caso de estudio, la mayoría de los cladodios de fructificación con materia fresca de ≈ 144 g (mínimo) a ≈ 964 g (máximo) tuvieron rendimientos de fruto de ≈ 409 g o más (Figura 2a). Además, la mayoría de los cladodios de fructificación con materia seca de ≈ 14.4 g (mínimo) a ≈ 78.52 g (máximo) tuvieron rendimientos de fruto de ≈ 409 g o más por cladodio (Figura 2b).

El exceso de materia fresca o seca del cladodio de fructificación requerido para producir fruto es un factor con el propósito de evitar una gran variación de niveles de productividad en años sucesivos; particularmente en plantas sin agobio hídrico o el efecto de otros factores limitantes del rendimiento de fruto. Ello provee un índice conveniente para predecir cuales cladodios producirán fruto (García de Cortázar y Nobel, 1992). Entonces, la productividad puede ser manipulada a través de la poda.

La poda con base en esos principios está justificada porque se sabe que las flores y los cladodios aparecen simultáneamente en la primavera. Las flores ocurren en su mayoría en el borde de los cladodios terminales de un año de edad, mientras que los cladodios nuevos se desarrollan por lo común en cladodios de dos años de edad o mayores (Inglese *et al.*, 1994a). Sin embargo, estimar la materia fresca o seca de cladodios de fructificación en campo y su uso durante la práctica de la poda no es tarea fácil. Por consiguiente, es preferible usar medidas de tamaño de cladodio en tal contexto, desde un punto de vista práctico como se explica en los siguientes párrafos.

La función cuadrática estimada para rendimiento de fruto por cladodio *versus* la longitud de cladodio de fructificación indica que a cladodios con longitud de ≈ 21.8 cm a ≈ 38.4 cm corresponde el 90 % del rendimiento de fruto asociado al vértice ($x = 30.1$ cm; $y = 1040.5$ g; Figura 3a). Por lo tanto, cladodios de fructificación con longitudes dentro de ese rango pueden incrementar la posibilidad de producir rendimientos de fruto de 936.4 g por cladodio. En el caso de la

tion and those for vegetative growth. Pruning is performed by replacing the terminal cladodes with the aim of reducing year-to-year variability in fruit production (Valdez-Cepeda *et al.*, 2013). Therefore, it is advisable to include, for instance, the estimated ranges of length and width measurements for 90 % of vertex yields per cladode when pruning is carried out in *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón' productive orchards under environmental and management conditions similar to those of the current experiment.

On the other hand, the estimated quadratic function for fruit yield per cladode against the ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width suggests cladodes with a morphometric ratio from ≈ 1.32 to ≈ 1.97 can be ascribable to 90 % of the fruit yield per cladode linked to the vertex ($x = 1.65$ and $y = 1094$ g, Figure 3c). That is, fruiting cladodes having a morphometric ratio within this range may increase the probability of having fruit yields per cladode of 984.6 g. This result must be taken with caution because of the drawback concerning the lack of more points to estimate the quadratic function as pointed out in the results section. Nonetheless, the estimated fruit yield per cladode linked to the vertex is higher than those estimated for the rest of the bivariate relationships. This is an interesting issue when considering the evidenced strange relationship between fruiting cladode width and fruiting cladode length (Figure 1b). This result, then, reinforces the previously suggested need to study the dynamic of the ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width, as mentioned *ut supra*, in *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón'.

Although our results were supported statistically, the samples of cladodes and fruits must be increased with observations from other orchards associated with a wide spectrum of environments and production systems involving *O. ficus-indica* L. variety 'Rojo Pelón'. We also recommend carrying out similar experiments with other *O. ficus-indica* varieties or *Opuntia* species. In addition, it is advisable to use the proposed estimated ranges of size measurements (length of ≈ 21.8 cm to ≈ 38.4 cm, and width of ≈ 15.2 cm to ≈ 20.8 cm) linked to 90 % of their corresponding vertex fruit yields per cladode when pruning is carried out. This is specifically proposed for *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón' if orchards are under environmental conditions similar to those mentioned in this report. Most one-year-old fruiting cladodes are expected to produce 13 fruits (90 % of the estimated highest number of fruits -15-) with mean fresh weight of 104 g each (90 % of the estimated highest fruit weight -116 g-) if previous results (*i.e.*, Valdez-Cepeda *et al.*, 2013) are taken into account. In other words, when pruning is carried out as suggested, it should be possible to obtain high yields per cladode and fruits with acceptable fresh weight and, of course, suitable commercial size. As a result, poor pruning practices could be avoided in order to reduce variability of *Opuntia ficus-indica* variety 'Rojo Pelón' fruit productivity at least at cladode, plant and orchard levels.

función cuadrática para rendimiento de fruto por cladodio *versus* ancho de cladodio de fructificación, el rango definido por el 90 % del rendimiento de fruto asociado al vértice ($x = 16.97$ cm; $y = 1384.4$ g; Figure 3b) es soportado por cladodios de fructificación con anchos de ≈ 15.2 cm a ≈ 20.8 cm. Así, los cladodios de fructificación con anchos dentro de ese intervalo podrían incrementar la probabilidad de producir rendimientos de fruto de 974.5 g por cladodio.

Es sabido que la poda puede ser realizada para lograr el balance propio entre cladodios de fructificación y cladodios con crecimiento vegetativo. La poda es practicada al reemplazar los cladodios terminales con el objetivo de reducir la variabilidad de producción de fruta en años continuos (Valdez-Cepeda et al., 2013). Por consiguiente, puede ser conveniente involucrar, por ejemplo, los intervalos estimados de las variables longitud y ancho vinculadas al 90 % de los rendimientos por cladodio asociados a los vértices cuando la poda se realice en huertas productivas de *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón', en condiciones ambientales y de manejo similares a las de la experiencia aquí presentada.

Por otra parte, la función cuadrática estimada para el rendimiento de fruto por cladodio *versus* la proporción dada por longitud y ancho de cladodio de fructificación sugiere que a los cladodios con una proporción morfométrica de ≈ 1.32 a ≈ 1.97 puede atribuirse el 90 % del rendimiento de fruto por cladodio vinculado al vértice ($x = 1.65$; $y = 1094$ g; Figure 3c). Es decir, los cladodios de fructificación con una proporción morfométrica dentro de tal rango pueden incrementar la probabilidad de producir rendimientos de fruto de 984.6 g por cladodio. Este resultado debe ser tomado en cuenta con precaución porque el inconveniente correspondiente a la carencia de más puntos para estimar la función cuadrática, como fue señalado en la sección de resultados. No obstante, el rendimiento de fruto por cladodio estimado asociado al vértice es mayor que los estimados para el resto de las relaciones bivariadas. Este es un problema interesante cuando se considera la relación extraña evidenciada entre el ancho y longitud de cladodio de fructificación (Figure 1b). Este resultado entonces refuerza la idea sobre la necesidad de estudiar la dinámica de la proporción entre longitud y ancho de cladodio de fructificación, como se mencionó *ut supra*, en *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón'.

Aunque nuestros resultados estuvieron soportados estadísticamente, las muestras de cladodios y frutos deben ser incrementadas con observaciones de otras huertas asociadas a un espectro amplio de ambientes y sistemas de producción en los que se involucre a *O. ficus-indica* L. variedad 'Rojo Pelón'. También, recomendamos realizar experiencias similares con otras variedades de *O. ficus-indica* o especies de *Opuntia*. Además, es aconsejable usar los rangos estimados de las variables de tamaño de cladodio (longitud de ≈ 21.8 cm a ≈ 38.4 cm, y anchos de ≈ 15.2 cm a ≈ 20.8 cm) asociados al 90 % de sus correspondientes vértices de rendimiento de fruto por cladodio cuando se realice la poda. Esto procede

CONCLUSIONS

In *O. ficus-indica* variety 'Rojo Pelón', fruiting cladode fresh matter increased linearly with fruiting cladode dry matter, thereby indicating a strong dependence. The strong estimated relationship suggests each g of dry matter should store 11.65 g of water.

A fruit yield per cladode dependence on fruiting cladode fresh matter was clearly evidenced. The estimated quadratic function suggests that fruiting cladodes with ≈ 558.9 g of fresh matter may be able to support high fruit yields (≈ 1065.3 g) per cladode.

Fruiting cladodes with ≈ 52.5 g of dry matter are able to produce high fruit yields (≈ 1044.5 g) per cladode.

A fruit yield per cladode dependence on fruiting cladode length was evidenced through a quadratic component. In addition, individual fruiting cladodes having between ≈ 21.8 cm and ≈ 38.4 cm in length (linked to 90 % of the estimated highest fruit yield per cladode, ≈ 1040.5 g) should be able to yield at least 936.4 g.

A fruit yield per cladode dependence on fruiting cladode width was identified. Moreover, fruiting cladodes with widths from ≈ 15.2 cm to ≈ 20.8 cm can be expected to support fruit yields of at least ≈ 974.5 g (90 % of the vertex) each.

A fruit yield per cladode dependence on the fruiting cladode's morphometric index (*i.e.* the ratio of fruiting cladode length to fruiting cladode width) was evidenced. Notably, the estimated fruit yield (≈ 1094 g) per cladode at the vertex appears to be linked to a fruiting cladode's morphometric index equal to 1.65.

It is advisable to use the proposed estimated ranges of size measurements (length of ≈ 21.8 cm to ≈ 38.4 cm, and width of ≈ 15.2 cm to ≈ 20.8 cm) linked to 90 % of their corresponding vertex fruit yields per cladode when pruning is carried out.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the Instituto de Investigación en Horticultura at the Universidad Autónoma Chapingo for providing part of the funding for this research.

End of English Version

específicamente para *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón' si las huertas están en condiciones ambientales similares a la del caso aquí presentado. Se espera que la mayoría de los cladodios de fructificación de un año de edad sean capaces de producir 13 frutos (90 % del estimado como el número mayor de frutos -15-) con peso fresco medio de 104 g cada uno (90 % del estimado como el peso de fruto mayor -116 g-), si los resultados previos (*i.e.*, Valdez-Cepeda *et al.*, 2013) son tomados en cuenta. En otras palabras, cuando se realice la poda como es recomendable, debe ser posible obtener rendimientos grandes de fruto por cladodio y frutos con peso fresco aceptables y, por supuesto, con tamaño comercial apropiado. Como resultado, una poda mal realizada debe evitarse con el propósito de reducir la variabilidad de la productividad de fruto en *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón', al menos en los niveles de cladodio, planta y huerta.

CONCLUSIONES

En *O. ficus-indica* variedad 'Rojo Pelón', la materia fresca de cladodio de fructificación se incrementó linealmente conforme la materia seca de cladodio de fructificación aumentó e indica una dependencia fuerte. La relación estimada sugiere que cada g de materia seca podría almacenar 11.65 g de agua.

El rendimiento de fruto por cladodio depende de la materia fresca de cladodio de fructificación. La función cuadrática estimada sugiere que los cladodios de fructificación con ≈ 558.9 g de materia fresca pueden ser capaces de producir rendimientos grandes de fruto de (≈ 1065.3 g) por cladodio.

Los cladodios de fructificación con ≈ 52.5 g de materia seca pueden ser capaces de producir rendimientos grandes de fruto (≈ 1044.5 g) por cladodio.

El rendimiento de fruto por cladodio depende de la longitud del cladodio de fructificación mediante un componente cuadrático. Además, los cladodios de fructificación, de manera individual, con longitudes de entre ≈ 21.8 cm y ≈ 38.4 cm (asociadas al 90 % del rendimiento por cladodio mayor estimado, ≈ 1040.5 g) deberían ser capaces de producir rendimientos de al menos 936.4 g.

El rendimiento de fruta por cladodio depende del ancho de cladodio de fructificación. Además, cada uno de los cladodios de fructificación con anchos de ≈ 15.2 cm a ≈ 20.8 cm pueden ser capaces de producir al menos rendimientos de fruto de ≈ 974.5 g (90 % del vértice).

El rendimiento de fruto por cladodio depende del índice morfométrico de los cladodios de fructificación (*i.e.* la proporción entre longitud y ancho de cladodio de fructificación). Notablemente, el rendimiento de fruto estimado (≈ 1094 g) por cladodio en el vértice parece estar asociado a un índice morfométrico de cladodio de fructificación igual a 1.65.

Es aconsejable usar los rangos de las variables de tamaño estimados y propuestos (longitud de ≈ 21.8 cm a ≈ 38.4 cm, y ancho de ≈ 15.2 cm a ≈ 20.8 cm) asociados al 90 % de sus correspondientes rendimientos de fruto máximos por cladodio cuando se realice la poda.

RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al 'Instituto de Investigación en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo' el financiamiento parcial del trabajo de investigación.

LITERATURA CITADA

- ANONYMOUS. 2010. Excel (Version 2010) [Computer Software for Microsoft Windows]. Microsoft Corporation. Redmond, Washington, USA.
- BLANCO-MACÍAS, F.; MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R.D.; VÁZQUEZ-ALVARADO, R.; OLIVARES-SÁENZ, E.; GUTIÉRREZ-ORNELAS, E.; VIDALES-CONTRERAS, J.A.; MURILLO-AMADOR, B. 2010. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* L. determined by means of the boundary-line approach. *Journal Plant Nutrition Soil Science* 173(6): 927-934. doi: 10.1002/jpln.200900147
- BOWERS, J. E. 1996. More flowers or new cladodes? Environmental correlates and biological consequences of sexual reproduction in a Sonoran Desert prickly pear cactus, *Opuntia engelmannii*. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 123(1): 34-40. opuntiads.com/O/wp-content/uploads/2012/01/ecology-opuntia-engelmannii.pdf
- EVANYLO, G.K.; SUMNER, M.E. 1987. Utilization of the boundary line approach in the development of soil nutrient norms for soybean production. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 18: 1379-1401. doi: 10.1080/00103628709367906
- EVANYLO, G.K. 1990. Soil and plant calibration for cucumbers grown in the mid-Atlantic coastal plain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 21: 251-272. doi: 10.1080/00103629009368229
- GARCÍA C., V.; NOBEL, P.S. 1992. Biomass and fruit production for the prickly pear cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the America Society of Horticultural Science* 117(4): 558-562. <http://journal.ashspublications.org/content/117/4/558.full.pdf>
- HINCKLEY, T.M.; ASLIN, R.G.; AUBUCHON, R.R.; METCALF, C.L.; ROBERTS, J.E. 1978. Leaf conductance and photosynthesis in four species of the oak-hickory forest type. *Forest Science* 24: 73-84.
- INGLESE, P.; BARBERA, G.; CARIMI, F. 1994a. The effect of different amounts of cladode removal on reflowering of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller). *Journal of the Horticultural Science* 69(1): 61-65. [www.researchgate.net/publication/235751213_The_effect_of_different_amounts_of_cladode_removal_on_reflowering_of_cactus_pear_\(Opuntia_ficus-indica_\(L.\)_Miller\)/file/50463525b149b667d0.pdf](http://www.researchgate.net/publication/235751213_The_effect_of_different_amounts_of_cladode_removal_on_reflowering_of_cactus_pear_(Opuntia_ficus-indica_(L.)_Miller)/file/50463525b149b667d0.pdf)

- INGLESE, P.; ISRAEL, A.A.; NOBEL, P.S. 1994b. Growth and CO₂ uptake for cladodes and fruit of the Crassulacean acid metabolism species *Opuntia ficus-indica* during fruit development. *Physiologia Plantarum* 91: 708-714. doi: 10.1111/j.1399-3054.1994.tb03009.x
- INGLESE, P.; BARBERA, G.; LA MANTIA T.; PORTOLANO, S. 1995. Crop production, growth, and ultimate size of cactus pear fruit following fruit thinning. *HortScience* 30(2): 227-230. <http://hortsci.ashspublications.org/content/30/2/227.full.pdf>
- INGLESE, P.; BARBERA, G.; LA MANTIA, T. 1999. Seasonal reproductive and vegetative growth patterns and resource allocation during cactus pear fruit growth. *HortScience* 34(1): 69-72. <http://hortsci.ashspublications.org/content/34/1/69.full.pdf>
- INGLESE, P.; BASILE, F.; SCHIRRA, M. 2002. Cactus Pear Fruit Production. In: Nobel, P.S. (Ed.). *Cacti: Biology and Uses*. University of California Press. Berkeley and Los Angeles, CA, USA. pp. 163-183.
- INGLESE, P.; COSTANZA, P.; GUGLUIZZA, G.; INGLESE, G.; LIGUORI, G. 2010. Influence of the within-tree and environmental factor on fruit quality of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) in Italy. *Fruits* 65(3): 179-189. doi: 10.1051/fruits/2010012
- LARK, R.M. 1997. An empirical method for describing the joint effects of environmental and other variables on crop yield. *Annals of Applied Biology* 131: 141-159. doi: 10.1111/j.1744-7348.1997.tb05402.x
- LUO, Y.; NOBEL, P.S. 1993. Growth characteristics of newly initiated cladodes of *Opuntia ficus-indica* as affected by shading, drought and elevated CO₂. *Physiologia Plantarum* 87: 467-474. doi: 10.1111/j.1399-3054.1993.tb02495.x
- MICHAEL, D.A.; DICKMAN, D.I.; GOTTSCHALK, K.W.; NELSON, N.D.; ISEBRANDS, J.G. 1985. Determining photosynthesis of the leaves in the field using a portable ¹⁴CO₂ apparatus: Procedures and problems. *Photosynthetica* 19: 98-108.
- NOBEL, P.S.; BOBICH, E.G. 2002. Environmental Biology. In: Nobel, P.S. (Ed.). *Cacti Biology and Uses*. University of California Press, Los Angeles and Berkeley, CA, USA. pp. 57-74.
- SCHMIDT, U.; HANSPETER, T.; KAUPENJOHANN, M. 2000. Using a boundary-line approach to analyze N₂O flux data from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 57: 119-129. doi: 10.1023/A:1009854220769
- VALDEZ-CEPEDA, R.D., BLANCO-MACÍAS, F., GALLEGOS-VÁZQUEZ, C., SALINAS-GARCÍA, G., VÁZQUEZ-ALVARADO, R.E. 2001. Freezing tolerance of *Opuntia* spp. *Journal of the Professional Association Cactus Development* 3: 105-115. www.jpacd.org/downloads/Vol4/AEI_2.pdf
- VALDEZ-CEPEDA, R.D., BLANCO-MACÍAS, F., MAGALLANES-QUINTANAR, R., VÁZQUEZ-ALVARADO, R.E., MÉNDEZ-GALLEGOS, S. DE J. 2013. Fruit weight and number of fruits per cladode depend on fruiting cladode fresh and dry weight in *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller variety 'Rojo Pelón'. *Scientia Horticulturae* 161: 165-169. doi: 10.1016/j.scienta.2013.06.009
- WEBB, R.A. 1972. Use of the boundary-line in the analysis of biological data. *Journal of the Horticultural Science* 47: 309-319.