

# Nitrogen fertilization in pecan and its effect on leaf nutrient concentration, yield and nut quality

## Fertilización nitrogenada en nogal pecanero y su efecto en la concentración de nutrientes foliares, rendimiento y calidad de nuez

Oscar Cruz-Alvarez<sup>1</sup>; Ofelia Adriana Hernández-Rodríguez<sup>1</sup>;  
Juan Luis Jacobo-Cuellar<sup>1</sup>; Graciela Ávila-Quezada<sup>1</sup>;  
Emilio Morales-Maldonado<sup>2</sup>; Rafael Ángel Parra-Quezada<sup>1</sup>;  
Loreto Robles-Hernandez<sup>1</sup>; Damaris Leopoldina Ojeda-Barrios<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas.

Campus 1 s/n, Chihuahua, Chihuahua, C. P. 31350, MÉXICO.

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico Superior de Huichapan. Domicilio conocido,  
el Saucillo s/n, Huichapan, Hidalgo, C. P. 42411, MÉXICO.

\*Corresponding author: [dojeda@uach.mx](mailto:dojeda@uach.mx), tel. 614 177 52 44.

### Abstract

Several studies indicate that nitrogen fertilization is one of the main constraints in obtaining higher yields and better nut quality in pecan (*Carya illinoensis* [Wangenh] K. Koch). Therefore, the aim of this research was to evaluate a single and split application of nitrogen in 'Western Schley' variety pecan, as well as its effect on leaf nutrient concentration, yield and nut quality. A randomized complete block design with six replicates was established. N doses were 100, 150 and 200 kg·ha<sup>-1</sup>; the single application was made in March and the split one in March and June. The leaf concentration of total N, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup>, yield (kg·tree<sup>-1</sup>), quality (nuts per kilogram and kernel percentage) and nitrogen use efficiency (NUE) were determined. Significant interaction between factors was detected for the Zn<sup>2+</sup> concentration and the single applied dose of 200 kg·ha<sup>-1</sup>. With the single application of 100 kg·ha<sup>-1</sup>, the highest yield (44.60 kg·tree<sup>-1</sup>) and nuts per kilogram (194.83) values were recorded, where the kernel percentage remained constant. The maximum NUE was obtained with 100 kg·ha<sup>-1</sup> applied in a single and split application (31.10 and 30.10 kg of nuts produced per kg of N applied, respectively). Increased yield and nut quality is the main objective in applying optimal N doses; however, ways of reducing the economic and environmental impact caused by its excessive application should also be sought.

**Keywords:** *Carya illinoensis*, edible kernel, nitrogen use efficiency, nutritional management, kernel percentage.

### Resumen

Diversas investigaciones indican que la fertilización nitrogenada es una de las principales limitantes para la obtención de mayores rendimientos y mejor calidad de la nuez en el nogal pecanero (*Carya illinoensis* [Wangenh] K. Koch). Por ello, el objetivo de esta investigación fue evaluar la aplicación total y fraccionada de nitrógeno en nogal pecanero variedad 'Western Schley', así como su efecto en la concentración de nutrientes foliares, rendimiento y calidad de nuez. Se estableció un diseño de bloques completos al azar con seis repeticiones. Las dosis de N fueron 100, 150 y 200 kg·ha<sup>-1</sup>; la aplicación total se realizó en marzo y la fraccionada en marzo y junio. Se determinó la concentración foliar de N total, P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> y Cu<sup>2+</sup>, el rendimiento (kg·árbol<sup>-1</sup>), la calidad (nueces por kilogramo y porcentaje de almendra) y la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN). Se detectó interacción significativa entre factores para la concentración de Zn<sup>2+</sup> y la dosis de 200 kg·ha<sup>-1</sup> aplicada en forma total. Con la aplicación total de 100 kg·ha<sup>-1</sup> se presentaron los valores más altos de rendimiento (44.60 kg·árbol<sup>-1</sup>) y nueces por kilogramo (194.83), donde el porcentaje de almendra se mantuvo constante. La máxima EUN se obtuvo con 100 kg·ha<sup>-1</sup> aplicados en forma total y parcial (31.10 y 30.10 kg de nuez producida por kg de N aplicado, respectivamente). El incremento del rendimiento y la calidad de nuez son el principal objetivo de aplicar dosis óptimas de N; sin embargo, también se debe buscar reducir el impacto económico y ambiental provocado por su aplicación excesiva.

**Palabras clave:** *Carya illinoensis*, almendra comestible, eficiencia de uso del nitrógeno, manejo nutrimental, porcentaje de almendra.

Please cite this article as follows (APA 6): Cruz-Alvarez, O., Hernández-Rodríguez, A. O., Jacobo-Cuellar, J. L., Ávila-Quezada, G., Morales-Maldonado, E., Parra-Quezada, R. A., Robles-Hernandez, L., & Ojeda-Barrios, D. L. (2020). Nitrogen fertilization in pecan and its effect on leaf nutrient concentration, yield and nut quality. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 26(3), 163-173. doi: 10.5154/r.rchsh.2019.10.021



Revista Chapingo  
Serie Horticultura

## Introduction

Pecan (*Carya illinoensis* [Wangenh] K. Koch) is a crop with a wide range of uses and high profitability. The area harvested of this crop by the world's main producing countries (China, Iran, United States, Turkey and Mexico) is between 96,909 and 390,924 ha, with a clear upward trend (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2018). Mexico stands out as the world's second largest pecan producer, with a production volume of 159,535 t. Among the states with the most production are Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango and Nuevo Leon, which together account for 94.3 % of this production (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018). Seventy percent of Mexico's total production is exported, mainly to the United States and China (Zhang, Peng, & Li, 2015).

Several studies report that water and nitrogen fertilization are the main limitations for obtaining higher yields and better nut quality (number of nuts per kilogram and kernel percentage) (Castillo-González et al., 2019; Flores-Córdova, Soto-Parra, Javier-Piña, Pérez-Leal, & Sánchez-Chávez, 2018; Retes-López, Nasaimea-Palafox, Moreno-Medina, Denogean-Ballesteros, & Martín-Rivera, 2014); poor management contributes to alternate bearing (Worley & Worley, 2000). Nitrogen is the nutrient with the highest demand and volume of application in pecan orchards (Zaragoza-Lira et al., 2011), since it has a direct relationship with leaf nutrient concentration (Acuña-Maldonado et al., 2003; Wells, 2011) and increased fertilization costs (Soto-Parra, Piña-Ramírez, Sánchez-Chávez, Pérez-Leal, & Basurto-Sotelo, 2016).

It has been observed that modifying the dose and timing of nitrogen application are favorable agronomic management practices for increasing the productivity of pecan trees (Sánchez et al., 2009). The use of organic sources of this element, such as compost and earthworm humus, has not shown a significant effect on the yield and quality of the nut, in addition to keeping the content of organic matter and nitrates unchanged (Soto-Parra et al., 2016), but they do represent an increase in the production cost due to nitrogen fertilization (Tarango-Rivero, Nevárez-Moorillón, & Orrantia-Borunda, 2009; Zaragoza-Lira et al., 2011).

Martínez-Rodríguez and Ávila-Ayala (2002) evaluated different N doses applied in northern Mexico to 'Western Schley' pecan trees in production, concluding that the 60 kg·ha<sup>-1</sup> dose showed the highest yield and quality values of the harvested nut. Flores-Córdova et al. (2018) applied 226, 121 and 94 kg·ha<sup>-1</sup> of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, and K<sub>2</sub>O, respectively, and found a yield of 1.94 t·ha<sup>-1</sup>, 159 nuts·kg<sup>-1</sup> and 59 % edible nut. Sánchez et al.

## Introducción

El nogal pecanero (*Carya illinoensis* [Wangenh] K. Koch) es un cultivo con una amplia gama de usos y alta rentabilidad. La superficie cosechada de este cultivo por los principales países productores del mundo (China, Irán, Estados Unidos, Turquía y México) se encuentra entre 96,909 y 390,924 ha, con una clara tendencia a incrementarse (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2018). México destaca por ser el segundo productor más importante a nivel mundial de nuez pecanera, con un volumen de producción de 159,535 t. Entre las entidades federativas con más producción se encuentran Chihuahua, Sonora, Coahuila, Durango y Nuevo León, que en conjunto representan el 94.3 % de dicha producción (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018). El 70 % de la producción total de México se exporta principalmente a Estados Unidos y China (Zhang, Peng, & Li, 2015).

Existen diversas investigaciones donde se reporta que el agua y la fertilización nitrogenada son las principales limitantes para la obtención de mayores rendimientos y mejor calidad de la nuez (número de nueces por kilogramo y porcentaje de almendra) (Castillo-González et al., 2019; Flores-Córdova, Soto-Parra, Javier-Piña, Pérez-Leal, & Sánchez-Chávez, 2018; Retes-López, Nasaimea-Palafox, Moreno-Medina, Denogean-Ballesteros, & Martín-Rivera, 2014); un manejo deficiente contribuye a la alternancia reproductiva (Worley & Worley, 2000). El nitrógeno es el nutriente con mayor demanda y volumen de aplicación en huertos de nogal pecanero (Zaragoza-Lira et al., 2011), ya que posee una relación directa con la concentración foliar de nutrientes (Acuña-Maldonado et al., 2003; Wells, 2011), así como con el incremento en los costos de fertilización (Soto-Parra, Piña-Ramírez, Sánchez-Chávez, Pérez-Leal, & Basurto-Sotelo, 2016).

Se ha observado que la modificación de la dosis y la época de aplicación de nitrógeno son prácticas de manejo agronómico favorables para incrementar la productividad de los árboles de nogal (Sánchez et al., 2009). El uso de fuentes orgánicas de dicho elemento, como la composta y el humus de lombriz, no ha mostrado un efecto significativo sobre el rendimiento y la calidad de la nuez, además de mantener sin cambios el contenido de materia orgánica y nitratos (Soto-Parra et al., 2016), pero sí representan un incremento en el costo de producción por concepto de fertilización nitrogenada (Tarango-Rivero, Nevárez-Moorillón, & Orrantia-Borunda, 2009; Zaragoza-Lira et al., 2011).

Martínez-Rodríguez y Ávila-Ayala (2002) evaluaron en el norte de México diferentes dosis de N en árboles de nogal 'Western Schley' en producción, y concluyeron que la dosis de 60 kg·ha<sup>-1</sup> mostró los valores más altos

(2009), in the municipality of Aldama, Chihuahua, Mexico, tested three nitrogen doses (160, 320 and 480 kg·ha<sup>-1</sup>), which they applied during pre-sprouting of the tree, fruit set and growth, aqueous and milky stages, ripening and postharvest, and reported that the 160 kg·ha<sup>-1</sup> dose improves the nitrogen use efficiency (NUE), productivity and quality of the nut (139 nuts·kg<sup>-1</sup> and 54 % kernel).

Yield response is associated with orchard management; however, in low production years there is an increase in kernel weight (Wells, 2010), where the supply of an essential element such as N should be used when leaf analysis reveals its deficiency (Medina-Morales, 2004). In addition to being an agronomic management practice that can contribute to increasing the yield of the main pecan production areas (Tarango-Rivero et al., 2009), knowing the optimum dose of nitrogen fertilization represents a decrease in the economic and environmental impact caused by the excessive application of chemical fertilizers (Zaragoza-Lira et al., 2011). Therefore, the objective of this research was to evaluate a single and split application of nitrogen in 'Western Schley' variety pecan, as well as its effect on leaf nutrient concentration, yield and nut quality.

## Materials and methods

### Location of the experiment, plant material and experimental design

The study was conducted from 2010 to 2014 in the so-called "La Florida" orchard, located in the municipality of Jimenez, Chihuahua, Mexico (27° 06' 16" NL and 104° 56' 09" WL, at 1,321 masl), with average annual temperature and precipitation of 18.6 °C and 369.8 mm, respectively. As plant material, we used 'Western Schley' pecan trees planted in 1989 in a real 12 x 12 m frame (69 trees·ha<sup>-1</sup>) in a xerosol type soil with the following characteristics: clay-silty texture (18.1 % sand, 40.6 % silt and 41.3 % clay), pH of 7.76, 0.75 % organic matter, 8.54 % carbonates and 1.0 dS·m<sup>-1</sup> electrical conductivity. According to a previous chemical analysis of the soil, the following results were found (mg·kg<sup>-1</sup>): 28.5 total N, 21.5 P, 1,075 K<sup>+</sup>, 3,900 Ca<sup>2+</sup>, 300 Mg<sup>2+</sup>, 406 Fe<sup>2+</sup>, 692 Mn<sup>2+</sup>, 86 Zn<sup>2+</sup> and 79 Cu<sup>2+</sup>. Water supply during the production cycle (March to October) was provided by means of a micro-sprinkler irrigation system, applying 1,300 L per tree in a 15-day interval between each irrigation. Weed control was done manually.

The factors studied were dose (100, 150 and 200 kg·ha<sup>-1</sup>) and mode of application (single and split, with the latter involving two applications of 50 % each) under a 3 x 2 factorial arrangement with six treatments. A randomized complete block experimental design with six replicates was used; the experimental unit was

de rendimiento y calidad de la nuez cosechada. Flores-Córdova et al. (2018) aplicaron 226, 121 y 94 kg·ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, respectivamente, y encontraron un rendimiento de 1.94 t·ha<sup>-1</sup>, 159 nueces·kg<sup>-1</sup> y 59 % de nuez comestible. Sánchez et al. (2009), en el municipio de Aldama, Chihuahua, México, probaron tres dosis de nitrógeno (160, 320 y 480 kg·ha<sup>-1</sup>), las cuales aplicaron en pre-brotación del árbol, amarre y crecimiento de fruto, estado acuoso y lechoso de almendra, madurez y poscosecha, y reportaron que la dosis de 160 kg·ha<sup>-1</sup> mejora la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), la productividad y la calidad de la nuez (139 nueces·kg<sup>-1</sup> y 54 % de almendra).

La respuesta en el rendimiento está asociada con el manejo de la huerta; sin embargo, en años de producción baja existe un incremento en el peso de la almendra (Wells, 2010), donde el suministro de un elemento esencial como el N debe ser empleado cuando el análisis foliar revele su deficiencia (Medina-Morales, 2004). Además de ser una práctica de manejo agronómico que puede coadyuvar al incremento del rendimiento de las principales zonas de producción de nogal pecanero (Tarango-Rivero et al., 2009), el conocer la dosis óptima de fertilización nitrogenada representa una disminución en el impacto económico y ambiental ocasionado por la excesiva aplicación de fertilizantes químicos (Zaragoza-Lira et al., 2011). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la aplicación total y fraccionada de nitrógeno en nogal pecanero variedad 'Western Schley', así como su efecto en la concentración de nutrientes foliares, rendimiento y calidad de nuez.

## Materiales y métodos

### Ubicación del experimento, material vegetal y diseño experimental

El estudio se realizó de 2010 a 2014 en la huerta conocida como "La Florida" ubicada en el municipio de Jiménez, Chihuahua, México, (27° 06' 16" latitud norte y 104° 56' 09" longitud oeste, a 1,321 msnm), con temperatura y precipitación media anual de 18.6 °C y 369.8 mm, respectivamente. Como material vegetal se emplearon árboles de nogal 'Western Schley' plantados en 1989 en marco real de 12 x 12 m (69 árboles·ha<sup>-1</sup>) sobre un suelo tipo xerosol con las siguientes características: textura arcillo-limosa (18.1 % arena, 40.6 % limo y 41.3 % arcilla), pH de 7.76, 0.75 % de materia orgánica, 8.54 % de carbonatos y 1.0 dS·m<sup>-1</sup> de conductividad eléctrica. De acuerdo con el análisis químico previo del suelo, se encontraron los resultados siguientes (mg·kg<sup>-1</sup>): 28.5 de N total, 21.5 de P, 1,075 de K<sup>+</sup>, 3,900 Ca<sup>2+</sup>, 300 de Mg<sup>2+</sup>, 406 de Fe<sup>2+</sup>, 692 Mn<sup>2+</sup>, 86 Zn<sup>2+</sup> y 79 de Cu<sup>2+</sup>. El suministro de agua durante el ciclo de producción (marzo a

a tree with a height of  $10 \pm 1$  m and a trunk diameter of  $29.87 \pm 2$  cm (measured at the beginning of the study at 20 cm above ground level). The N source was ammonium sulfate (20.5 % N and 24 % S). Nitrogen fertilizer was applied in a band at a depth of 10 cm and 3 m from the trunk in the shaded area of the tree. The first application was made during the third week of March (flowering) in all treatments, and the second split application was made during the second week of June (fruiting). In each evaluation year, and in parallel to the total application of N, 100 kg·ha<sup>-1</sup> of P and K were also applied, where the P source was phosphoric acid (49 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 1.61 kg·L<sup>-1</sup> density) and the K source was potassium thiosulfate (12.6 % K<sub>2</sub>O and 1.46 kg·L<sup>-1</sup> density).

### Parameters evaluated

#### *Leaf nutrients*

In the evaluation years (2010 to 2014), during the third week of July, leaf samples were taken for nutritional analysis, this in accordance with the indications of Ojeda-Barrios et al. (2014). To do this, 40 pairs of healthy leaflets (absence of mechanical damage or presence of pests and diseases) from the current growth cycle were selected from each experimental unit, located in the middle of the tree canopy and the four cardinal points. The leaflets were washed with a 0.1 % phosphate-free detergent solution, followed by a rinsing with deionized water and drying at 80 °C in an oven (Heratherm™ VCA 230, Thermo Scientific™, USA). The samples were homogenized in a mill (Wiley®, USA) with 1 mm mesh. Total N was quantified by the Micro-Kjeldahl method (Novatech®, USA and Micro Kjeldahl Labconco®, USA) (Fernández, del Río, Abadía, & Abadía, 2006). The concentration of Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, Cu<sup>++</sup>, Fe<sup>++</sup>, Mn<sup>++</sup> and Zn<sup>++</sup> was determined from 1 g of the dry sample by triacid digestion with HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (25 mL mixture at a 10:1:0:25 ratio). Analyte quantifications were performed with an atomic absorption spectrophotometer (Series 300, Thermo Scientific™, USA), and total P was determined with the vanadate-ammonium molybdate method (Ojeda-Barrios et al., 2014).

#### *Yield, nut quality and nitrogen use efficiency*

The harvest for each evaluation year (2010 to 2014) was carried out in the fourth week of November, where each experimental unit was mechanically vibrated and the nuts were collected, counted and weighed with a scale (Combo-Rhino-122, Rhino®, Mexico) with a sensitivity of 0.1 g, this to obtain the yield in kg·tree<sup>-1</sup>. Quality variables (number of nuts per kilogram and percentage of edible nut) were determined according to the method indicated by the Mexican Standard

octubre) se realizó mediante un sistema de riego por microaspersión, aplicando 1,300 L por árbol en un intervalo de 15 días entre cada riego. El control de malezas se realizó de manera manual.

Los factores estudiados fueron dosis (100, 150 y 200 kg·ha<sup>-1</sup>) y forma de aplicación (total y fraccionada, dos aplicaciones de 50 % cada una) bajo un arreglo factorial 3 x 2 con seis tratamientos. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con seis repeticiones, donde la unidad experimental fue un árbol con una altura de  $10 \pm 1$  m y diámetro de tronco de  $29.87 \pm 2$  cm (medido al inicio del estudio a 20 cm sobre el nivel del suelo). La fuente de N fue sulfato de amonio (20.5 % N y 24 % S). La aplicación del fertilizante nitrogenado se realizó en banda a 10 cm de profundidad y a 3 m del tronco (área de sombreado del árbol). La primera aplicación se realizó durante la tercera semana de marzo (floración) en todos los tratamientos, y la aplicación fraccionada fue la segunda semana de junio (fructificación). En cada año de evaluación, y de forma paralela a la aplicación total de N, también se aplicaron 100 kg·ha<sup>-1</sup> de P y K<sup>+</sup>, donde la fuente de P fue el ácido fosfórico (49 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 1.61 kg·L<sup>-1</sup> de densidad) y la fuente de K fue el tiosulfato de potasio (12.6 % K<sub>2</sub>O y 1.46 kg·L<sup>-1</sup> de densidad).

### Parámetros evaluados

#### *Nutrientes foliares*

En los años de evaluación (2010 a 2014), durante la tercera semana de julio, se realizó la toma de muestras de hojas para el análisis nutrimental; esto de acuerdo con lo indicado por Ojeda-Barrios et al. (2014). Para ello, de cada unidad experimental se seleccionaron 40 pares de folíolos sanos (ausencia de daños mecánicos o presencia de plagas y enfermedades) del ciclo de crecimiento en curso, ubicados en la parte media del dosel del árbol y de los cuatro puntos cardinales. Los folíolos se lavaron con una solución al 0.1 % de detergente libre de fosfato, seguido de un enjuague con agua desionizada y secado a 80 °C en una estufa (Heratherm™ VCA 230, Thermo Scientific™, EUA). Las muestras se homogeneizaron en un molino (Wiley®, EUA) con malla de 1 mm. El N total se cuantificó por el método de Micro-Kjeldahl (Novatech®, EUA y Micro Kjeldahl Labconco®, EUA) (Fernández, del Río, Abadía, & Abadía, 2006). A partir de 1 g de la muestra seca se determinó la concentración de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> y Zn<sup>2+</sup> por digestión triácida con HNO<sub>3</sub>, HClO<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (25 mL de mezcla en una proporción 10:1:0:25). Las cuantificaciones de los analitos se realizaron con un espectrofotómetro de absorción atómica (Serie 300, Thermo Scientific™, EUA), y con el método de vanadato-molibdato de amonio se determinó el P total (Ojeda-Barrios et al., 2014).



NMX-FF-084-SCFI-2009 for non-industrialized food products for human consumption, such as pecan (Secretaría de Economía, 2009). The number of nuts per kilogram was the product of the total number of nuts harvested per tree by their total weight. To obtain the percentage of edible nut, 300 g of nuts were selected per experimental unit, the shell was separated from the kernel (edible part) and the weight was obtained with a portable electronic scale (Scout Pro SP202, Ohaus®, USA) with a sensitivity of 0.01 g; finally, the weight was divided by the initial value of the sample (300 g) and multiplied by 100. On the other hand, the NUE was determined according to the methodology proposed by Sánchez et al. (2009), which considers the ratio between the kilograms of nut harvested and the kilograms of N applied, both per hectare.

### Statistical analysis

Data analysis was performed with information from the five years of the study. Normality was verified with the Kolmogorov-Smirnov test (Sokal & Rohlf, 1995), and when this assumption was not fulfilled, log base 10 was used for data transformation. Subsequently, an analysis of variance was performed with the randomized complete block experimental design, considering a factorial treatment design. In the characters where treatment effect was detected, Tukey's mean comparisons tests ( $P \leq 0.05$ ) were performed. In all cases, SAS statistical software version 9.3 (SAS Institute Inc., 2011) was used.

## Results and discussion

### Leaf nutrients

The leaf concentration of total N, P and K<sup>+</sup> showed no significant difference in relation to the N doses, the application mode or their interaction (Table 1), which was confirmed by the absence of interveinal chlorosis in mature leaflets. The intervals found in this study for N (27.4 to 28.9 g·kg<sup>-1</sup>), P (1.6 to 1.7 g·kg<sup>-1</sup>) and K<sup>+</sup> (10.6 to 11.6 g·kg<sup>-1</sup>) are similar to those reported by Medina-Morales (2004) and Walworth, White, Comeau, and Heerema (2017) in pecan orchards in production, located in northern Mexico and the southeastern United States of America. Likewise, Martínez-Rodríguez and Ávila-Ayala (2002) found no statistical difference among treatments with the application of 60, 120 and 180 kg·ha<sup>-1</sup> of ammonium sulfate in relation to the leaf concentration of total N. In this sense, the magnitude of the response of pecan to N fertilization does not show a trend based on the applied dose. However, the same does not occur with P and K, since their reaction is slow or undetectable (Smith, Rohla, & Goff, 2012), and its effect can be seen in kernel weight and percentage (Smith & Cheary, 2013), hence the importance of

### *Rendimiento, calidad de nuez y eficiencia de uso del nitrógeno*

La cosecha para cada año de evaluación (2010 a 2014) se realizó en la cuarta semana de noviembre, donde cada unidad experimental se hizo vibrar mecánicamente y se recogieron, contaron y pesaron las nueces con una báscula (Combo-Rhino-122, Rhino®, México) con sensibilidad de 0.1 g, esto para obtener el rendimiento en kg·árbol<sup>-1</sup>. Las variables de calidad (número de nueces por kilogramo y porcentaje de nuez comestible) se determinaron de acuerdo con el método indicado por la Norma Mexicana NMX-FF-084-SCFI-2009 para productos alimenticios no industrializados para consumo humano, nuez pecanera (Secretaría de Economía, 2009). El número de nueces por kilogramo fue producto del número total de nueces cosechadas por árbol entre el peso total de las mismas. Para obtener el porcentaje de nuez comestible, se seleccionaron 300 g de nueces por unidad experimental, se separó la cáscara de la almendra (parte comestible) y se obtuvo el peso con una balanza electrónica portátil (Scout Pro SP202, Ohaus®, EUA) con sensibilidad de 0.01 g; finalmente, el peso se dividió entre el valor inicial de la muestra (300 g) y se multiplicó por 100. Por otro lado, la EUN se determinó de acuerdo con la metodología propuesta por Sánchez et al. (2009), que considera el cociente entre los kilogramos de nuez cosechada y los kilogramos de N aplicado, ambos por hectárea.

### Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó con la información de los cinco años del estudio. Se verificó la normalidad con la prueba de Kolmogorov-Smirnov (Sokal & Rohlf, 1995), y cuando no se cumplió este supuesto, se empleó la transformación de datos con logaritmo base 10. Posteriormente, se realizó el análisis de varianza con el diseño experimental de bloques completos al azar, considerando un diseño de tratamientos factorial. En los caracteres donde se detectó efecto de tratamientos, se realizaron pruebas de comparaciones de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ). En todos los casos se empleó el programa estadístico SAS versión 9.3 (SAS Institute Inc., 2011).

## Resultados y discusión

### Nutrientes foliares

La concentración foliar de N total, P y K<sup>+</sup> no mostró diferencia significativa en relación con las dosis de N, la forma de aplicación o la interacción de ellos (Cuadro 1), lo cual se confirmó con la ausencia de clorosis interveinal en folíolos maduros. Los intervalos encontrados en este estudio para N total (27.4 a 28.9 g·kg<sup>-1</sup>), P (1.6 a 1.7 g·kg<sup>-1</sup>) y K<sup>+</sup> (10.6 a 11.6 g·kg<sup>-1</sup>) son similares a

**Table 1. Comparison of means of the interaction of nitrogen (N) dose ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) and application mode (single or split) on the leaf nutrient concentration in 'Western Schley' pecan trees.**

**Cuadro 1. Comparación de medias de la interacción de la dosis de nitrógeno (N) ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y forma de aplicación (total o fraccionada) sobre la concentración nutrimental en hojas de árboles de nogal pecanero 'Western Schley'.**

Dose and application mode (kg·ha <sup>-1</sup> ) / Dosis y forma de aplicación (kg·ha <sup>-1</sup> )	Total N / N total	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
g·kg <sup>-1</sup>					mg·kg <sup>-1</sup>				
100 <sub>single</sub> / 100 <sub>total</sub>	27.4 a <sup>z</sup>	1.6 a	11.2 a	20 a	4.0 a	140.3 a	539.0 a	36.9 ab	9.21 a
150 <sub>single</sub> / 150 <sub>total</sub>	28.8 a	1.6 a	11.4 a	17 b	4.0 ab	138.6 a	632.6 a	35.8 ab	9.5 a
200 <sub>single</sub> / 200 <sub>total</sub>	28.4 a	1.6 a	11.1 a	19 ab	4.0 ab	132.2 a	569.9 a	39.7 a	10.0 a
100 <sub>split</sub> / 100 <sub>fraccionado</sub>	28.9 a	1.6 a	11.6 a	18 ab	4.0 ab	122.1 a	411.8 a	35.9 ab	9.1 a
150 <sub>split</sub> / 150 <sub>fraccionado</sub>	28.6 a	1.7 a	10.8 a	19 ab	3.0 b	125.8 a	393.5 a	32.9 b	9.3 a
200 <sub>split</sub> / 200 <sub>fraccionado</sub>	28.6 a	1.6 a	10.6 a	19 ab	4.0 ab	133.2 a	472.8 a	36.8 ab	9.5 a
CV (%)	2.3	5.7	5.2	11.0	12.3	6.3	22.2	4.9	6.5

CV = coefficient of variation. <sup>2</sup>Means with the same letters within each column do not differ statistically (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Data correspond to the average obtained from 2010 to 2014.

CV = coeficiente de variación. <sup>2</sup>Medias con las mismas letras dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Los datos corresponden al promedio obtenido de 2010 a 2014.

monitoring and making timely applications to maintain optimal levels of these elements (Pond et al., 2006).

Significant interaction between dose and application mode of N was detected for Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup>, where the highest leaf concentration of calcium and magnesium was obtained with the single application of 100  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , with values of 20 and 4.0  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. Similar values of calcium (20.2  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and magnesium (4.94  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) are reported by Pond et al. (2006) in pecan orchards established in Arizona, USA, as well as by Medina-Morales (2004) in northern Mexico, with 18.0 and 3.82  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. Leaf calcium and magnesium concentrations found in this study can be considered adequate or normal, according to the concentration range of 15.7 to 24.2 and 3.9 to 5.0  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively, indicated for these elements by Pond et al. In this regard, Zaragoza-Lira et al. (2011) report that the presence of calcareous soils with high base saturation and a pH between 7 and 8 increases the absorption of calcium and magnesium. In the case of magnesium, a similar concentration was maintained throughout the evaluation years.

In this work, no significant interaction between dose and application mode of N was detected for the concentration of Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> in the leaflets. In this regard, Pond et al. (2006), in determining the standard nutrient concentration in 'Western Schley' trees grown in Arizona, report ranges (low, normal and high) of values for Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup>, and when comparing these ranges with the values obtained in this work, it can be seen that Mn<sup>2+</sup> is in the normal range (104 to 673  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Fe<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> values were similar to

los reportados por Medina-Morales (2004) y Walworth, White, Comeau, y Heerema (2017) en huertas de nogal en producción, ubicadas en el norte de México y Sureste de Estados Unidos de Norteamérica. Asimismo, Martínez-Rodríguez y Ávila-Ayala (2002) no encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos con la aplicación de 60, 120 y 180  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de sulfato de amonio con relación a la concentración foliar de N total. En este sentido, la magnitud de la respuesta del nogal a la fertilización con N no muestra una tendencia de acuerdo con la dosis aplicada. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el P y K<sup>+</sup>, dado que su reacción es lenta o no detectable (Smith, Rohla, & Goff, 2012), y su efecto se puede constatar en el peso y porcentaje de almendra (Smith & Cheary, 2013), de ahí la importancia de monitorear y realizar la aplicación oportuna para mantener los niveles óptimos de estos elementos (Pond et al., 2006).

Se detectó interacción significativa entre dosis y forma de aplicación de N para Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Zn<sup>2+</sup>, donde la mayor concentración foliar de calcio y magnesio se obtuvo con la aplicación total de 100  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , con valores de 20 y 4.0  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectivamente. Valores similares de calcio (20.2  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y magnesio (4.94  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) son reportados por Pond et al. (2006) en huertas de nogal establecidas en Arizona, EUA, así como por Medina-Morales (2004) en el norte de México, con 18.0 y 3.82  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectivamente. Las concentraciones foliares de calcio y magnesio encontradas en este estudio pueden ser consideradas adecuadas o normales, esto de acuerdo con el rango de concentración de 15.7 a 24.2 y de 3.9 a 5.0  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectivamente, indicados para dichos elementos por Pond et al. (2006). En este sentido, Zaragoza-Lira et al.

the reported ranges of 104 to 673 and 6 to 10 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively. This may be associated with a slight decrease in the initial pH value (7.76) in the root zone of the trees, since many microelements, among them Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup>, are found in unavailable forms or in conditions that prevent their absorption when the pH is alkaline (Tarango-Rivero et al., 2009). The latter is associated with the prevailing aridity conditions in the main pecan production areas in Mexico (Flores-Córdova et al., 2018; Martínez-Rodríguez, & Ávila-Ayala, 2002; Medina-Morales, 2004).

Regarding Zn<sup>2+</sup>, the single application of 200 kg·ha<sup>-1</sup> of N significantly increased the leaf concentration of this nutrient (39.7 g·kg<sup>-1</sup>), in relation to the 32.9 g·kg<sup>-1</sup> obtained with 150 kg·ha<sup>-1</sup> of N applied on a split basis (Table 1). In the particular case of pecan, after N, Zn<sup>2+</sup> is the most important nutrient element, and its deficiency (20 mg·kg<sup>-1</sup>) is manifested by an excessive reduction in vegetative growth (rosetting) (Castillo-González et al., 2019), associated with the presence of alkaline soils as indicated by Ojeda-Barrios, Abadía, Lombardini, Abadía, and Vázquez, 2012. Heerema et al. (2017) point out that the sufficiency ranges for Zn<sup>2+</sup> are between 20 and 50 mg·kg<sup>-1</sup>. On the other hand, Pond et al. (2006) indicate that the normal concentration is between 86 and 256 mg·kg<sup>-1</sup>, which exceeds the values found in this study, so they could be considered as insufficient.

Given the difference between what was observed and reported by other authors, it is important to note that during the evaluation no interveinal chlorosis, necrosis or presence of leaves with undulate rosette margins were observed (Castillo-González et al., 2019). Additionally, it is important to consider that the pecan tree shows an alternate behavior with respect to its production (Flores-Córdova et al., 2018), and in high production years, the demand for macro and micronutrients is greater and its leaf concentration shows a decreasing trend, contrary to what occurs in low production years (Smith, 2010; Smith et al., 2012; Wood, Conner, & Worley, 2003).

### Yield, nut quality and nitrogen use efficiency

Nut yield and quality are widely associated with the contribution of N (Sánchez et al., 2009). In this study, after five production and evaluation cycles, significant interaction was observed for yield, number of nuts per kilogram and NUE; thus, the 100 kg·ha<sup>-1</sup> N dose with both application modes showed the highest NUE value ( $P \leq 0.05$ ) (Table 2). The yield of 44.60 kg·tree<sup>-1</sup>, obtained with the 100 kg·ha<sup>-1</sup> in a single application, was statistically higher than the 34.78 kg·tree<sup>-1</sup> achieved with the 150 kg·ha<sup>-1</sup> split application (Table 2). These results contrast with data reported by Castillo-González et al. (2019) of 15.67 ± 1.96 kg·tree<sup>-1</sup> in 20-year-old pecan orchards.

(2011) mencionan que la presencia de suelos calcáreos con una alta saturación de bases y un pH entre 7 y 8 incrementa la absorción de calcio y magnesio. Para el caso de magnesio, se mantuvo una concentración similar a través de los años de evaluación.

En este trabajo, no se detectó interacción significativa entre dosis y forma de aplicación de N para la concentración de Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> y Cu<sup>2+</sup> en los folíolos. Al respecto, Pond et al. (2006), al determinar la concentración estándar nutrimental en árboles de 'Western Schley' cultivados en Arizona, reportan rangos (bajo, normal y alto) de valores para Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> y Cu<sup>2+</sup>, y al comparar dichos rangos con los valores obtenidos en este trabajo se observa que el Mn<sup>2+</sup> se encuentra en el rango normal (104 a 673 mg kg<sup>-1</sup>). Los valores de Fe<sup>2+</sup> y Cu<sup>2+</sup> fueron similares a los rangos reportados de 104 a 673 y de 6 a 10 mg·kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Lo anterior puede estar asociado con una ligera disminución del valor inicial de pH (7.76) en la zona radicular de los árboles, dado que muchos microelementos, entre estos el Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> y Cu<sup>2+</sup>, se encuentran en forma no disponible o en condiciones que impiden su absorción cuando el pH es alcalino (Tarango-Rivero et al., 2009). Esto último está asociado con las condiciones de aridez prevalecientes en las principales zonas de producción de nogal en México (Flores-Córdova et al., 2018; Martínez-Rodríguez, & Ávila-Ayala, 2002; Medina-Morales, 2004).

En cuanto al Zn<sup>2+</sup>, la aplicación de 200 kg·ha<sup>-1</sup> de N en forma total incrementó significativamente la concentración foliar de este nutriente (39.7 g·kg<sup>-1</sup>), en relación con los 32.9 g·kg<sup>-1</sup> obtenidos con 150 kg·ha<sup>-1</sup> de N aplicado en forma fraccionada (Cuadro 1). En el caso particular del nogal, después del N, el Zn<sup>2+</sup> constituye el elemento nutrimental más importante, y su deficiencia (20 mg·kg<sup>-1</sup>) se manifiesta con la excesiva reducción del crecimiento vegetativo "roseteado" (Castillo-González et al., 2019) asociado con la presencia de suelos alcalinos, tal como lo indican Ojeda-Barrios, Abadía, Lombardini, Abadía, y Vázquez (2012). Heerema et al. (2017) señalan que los rangos de suficiencia para Zn<sup>2+</sup> se encuentran entre 20 y 50 mg·kg<sup>-1</sup>. Por su parte, Pond et al. (2006) indican que la concentración normal está entre 86 y 256 mg·kg<sup>-1</sup>, lo cual supera los valores encontrados en este estudio, por lo que se podrían considerar como insuficientes.

Dada la diferencia entre lo observado y reportado por otros autores, es importante señalar que durante la evaluación no se observó clorosis intervenal, necrosis o presencia de hojas con márgenes ondulados roseteados (Castillo-González et al., 2019). Adicionalmente, es importante considerar que el árbol de nogal muestra un comportamiento alternante con respecto a su producción (Flores-Córdova et al., 2018), y en los años de producción alta, la demanda de macro y

**Table 2. Comparison of means of the interaction of nitrogen dose ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) and application mode (single or split) on yield, nut quality and nitrogen use efficiency (NUE) in Western Schley pecan trees.**

**Cuadro 2. Comparación de medias de la interacción de la dosis de nitrógeno ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) y la forma de aplicación (total o fraccionada) sobre el rendimiento, la calidad de nuez y la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) en árboles de nogal pecanero 'Western Schley'.**

Dose and application mode ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) / Dosis y forma de aplicación ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	Yield ( $\text{kg}\cdot\text{tree}^{-1}$ ) / Rendimiento ( $\text{kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$ )	Number of nuts per kg / Número de nueces por kg	Edible kernel (%) / Almendra comestible (%)	NUE ( $\text{kg}_{\text{nut}}\cdot\text{kg}_{\text{N}}^{-1}$ ) / EUN ( $\text{kg}_{\text{nuez}}\cdot\text{kg}_{\text{N}}^{-1}$ )
100 <sub>single</sub> / 100 <sub>total</sub>	44.60 a <sup>z</sup>	194.8 a	57.1 a	31.10 a
150 <sub>single</sub> / 150 <sub>total</sub>	38.90 ab	186.7 b	58.7 a	18.15 b
200 <sub>single</sub> / 200 <sub>total</sub>	40.48 ab	187.1 ab	58.3 a	14.10 c
100 <sub>split</sub> / 100 <sub>fraccionado</sub>	43.06 ab	196.2 a	56.3 a	30.10 a
150 <sub>split</sub> / 150 <sub>fraccionado</sub>	34.78 b	186.9 b	58.3 a	16.23 b
200 <sub>split</sub> / 200 <sub>fraccionado</sub>	42.09 ab	188.6 ab	58.1 a	14.00 c
CV (%)	11.28	4.00	8.97	12.00

CV = coefficient of variation. <sup>z</sup>Means with the same letters within each column do not differ statistically (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Data correspond to the average obtained from 2010 to 2014.

CV = coeficiente de variación. <sup>z</sup>Medias con las mismas letras dentro de cada columna no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). Los datos presentados corresponden al promedio obtenido de 2010 a 2014.

Acuña-Maldonado et al. (2003), with the annual (October) application of  $125 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  of N and split in 'Western Schley' pecan, found no significant differences related to the yield obtained per tree, which indicates that the use of this element could be associated with the vegetative sprouting of the following growth period rather than with the development of the fruit (Sánchez et al., 2009). Additionally, some researchers indicate that the fact that the trees remain with leaves until mid-October affects the accumulation of photoassimilates, which are favorable at the start of sprouting and during fruit set and growth (Acuña-Maldonado et al., 2003; Wells, 2011). The application of a lower N amount to the soil decreases its contamination by volatilization, leaching and denitrification processes (Soto-Parra et al., 2016); it also reduces production costs linked to the application of nitrogen fertilizers (Flores-Córdova et al., 2018).

Soil pH is another factor to consider, since it considerably affects the availability of nutrients and, consequently, root absorption. In this work, no changes in pH values were observed, which could be explained by the buffering capacity of the soil and the way in which the fertilizer was added in the experiment (Wells, 2011).

The average value of 194.8 nuts per kilogram obtained in trees fertilized with  $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  of N in a single application at the beginning of the year was significantly higher compared to the 186.9 obtained with  $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  applied in the split application mode in March and June. In contrast, Sánchez et al. (2009), with a split application of N (using ammonium sulfate as a source) based on the tree's phenological stage (pre-

micronutrientes es mayor y su concentración foliar muestra una tendencia decreciente, contrario a lo que se presenta en los años de producción baja (Smith, 2010; Smith et al., 2012; Wood, Conner, & Worley, 2003).

#### Rendimiento, calidad de la nuez y eficiencia de uso del nitrógeno

El rendimiento y la calidad de nuez se encuentran ampliamente asociadas con la aportación de N (Sánchez et al., 2009). En este estudio, después de cinco ciclos de producción y evaluación, se observó interacción significativa para rendimiento, número de nueces por kilogramo y EUN; así, la dosis de  $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de N con ambas formas de aplicación mostró el mayor valor de EUN ( $P \leq 0.05$ ) (Cuadro 2). El rendimiento de  $44.60 \text{ kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$ , obtenido con la dosis  $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  en forma total, fue estadísticamente superior a los  $34.78 \text{ kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$  alcanzados con la aplicación de  $150 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  en forma fraccionada (Cuadro 2). Estos resultados contrastan con datos reportados por Castillo-González et al. (2019) de  $15.67 \pm 1.96 \text{ kg}\cdot\text{árbol}^{-1}$  en huertas de nogal con 20 años de establecidas.

Acuña-Maldonado et al. (2003), con la aplicación anual (octubre) de  $125 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de N y fraccionada en nogal 'Western Schley', no encontraron diferencias significativas relacionadas con el rendimiento obtenido por árbol, lo cual indica que el uso de este elemento pudiese estar asociado con la brotación vegetativa del siguiente periodo de crecimiento más que con el desarrollo del fruto (Sánchez et al., 2009). Adicionalmente, algunos investigadores indican que el hecho de que los árboles permanezcan con hojas



sprouting, start of fruit set, fruit growth, aqueous stage, milky stage, fruit ripening and post-harvest recharge), report 139, 140 and 142 nuts per kg, for 160, 320 and 480 kg·ha<sup>-1</sup> of N, respectively. What was found in this study may be associated with a decrease in size and lower quality (Wells, 2011). Also, the number of nuts per kilogram is a quantitative characteristic and directly influences weight (Smith, Wood, & Raun, 2007). According to NMX-FF-084-SCFI-2009, the values found correspond to the average size of the nut (171 to 210 nuts per kg).

Another important quality variable is the percentage of edible kernel, since it maintains a directly proportional relationship with the value obtained in the market, and is a valued characteristic among nut producers (Flores-Córdova et al., 2018). In this study, the values of the percentage of edible nut ranged from 56.3 to 58.7, showing no statistical difference due to the dose, the mode of N application or their interaction (Table 2). Flores-Córdova et al. (2018) and Sánchez et al. (2009) obtained similar results and, according to NMX-FF-084-SCFI-2009, the percentage of kernel obtained is classified as excellent.

As a result of the increased cost of nitrogen fertilizers and the pollution generated by their excessive application, it is essential to use indicators such as NUE, which is a measure of the productive efficiency of the pecan crop (Sánchez et al., 2009). In this study, data ranged from 14.00 to 31.10 kg of nut produced per kg of applied N, where single and split applications of 100 kg·ha<sup>-1</sup> were statistically more outstanding (31.10 and 30.10 kg of nut produced per kg of applied N, respectively) (Table 2). The above, in practical terms, indicates the difference between applying 100 or 200 kg·ha<sup>-1</sup>, which in addition to not affecting the yield obtained represents a significant economic outlay for the producer (Ojeda-Barrios et al., 2012; Wells, 2010). Sánchez et al. (2009) report values of 16.91 kg of nut produced per kg of N applied, this with the split application of 160 kg·ha<sup>-1</sup> of N in seven applications based on the 'Western Schley' pecan's phenological stages.

## Conclusions

The N dose and application mode did not affect the leaf concentration of total N, P, K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> or Cu<sup>2+</sup>. Significant interaction between factors was detected for the concentration of Zn<sup>2+</sup> and the single applied N dose of 200 kg·ha<sup>-1</sup>, by significantly increasing the leaf concentration of this nutrient to 39.7 g·kg<sup>-1</sup>. With the single application of 100 kg·ha<sup>-1</sup> of N, the highest values of yield (44.60 kg·tree<sup>-1</sup>) and nuts per kilogram (194.8) were achieved, while the kernel percentage remained unchanged. The maximum nitrogen use efficiency was obtained with the 100 kg·ha<sup>-1</sup> dose in a single or split

hasta mediados de octubre incide en la acumulación de fotoasimilados, los cuales son favorables al momento de iniciar la brotación, el amarre y el crecimiento de los frutos (Acuña-Maldonado et al., 2003; Wells, 2011). La aplicación de una menor cantidad de N al suelo disminuye la contaminación del mismo por procesos de volatilización, lixiviación y desnitrificación (Soto-Parra et al., 2016); además, reduce los costos de producción por concepto de aplicación de fertilizantes nitrogenados (Flores-Córdova et al., 2018).

El pH del suelo es otro factor a considerar, ya que afecta de manera considerable la disponibilidad de los nutrientes y, en consecuencia, la absorción radicular. En este trabajo no se observaron cambios en los valores de pH, lo cual se podría explicar a través de la capacidad amortiguadora que tiene el suelo y la manera en cómo se adicionó el fertilizante en el experimento (Wells, 2011).

El valor promedio de 194.8 nueces por kilogramo, obtenido en los árboles fertilizados con 100 kg·ha<sup>-1</sup> de N en aplicación total a inicio de año, fue significativamente mayor en relación con los 186.9 obtenidos con 150 kg·ha<sup>-1</sup> aplicados en forma fraccionada en marzo y junio. En contraste, Sánchez et al. (2009), con la aplicación multifraccionada de N (usando como fuente sulfato de amonio) de acuerdo con la etapa fenológica (pre-brotación, inicio de amarre de fruto, crecimiento de fruto, estado acuoso, estado lechoso, maduración y recarga poscosecha), reportan 139, 140 y 142 nueces por kg, para 160, 320 y 480 kg·ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente. Lo encontrado en este estudio puede estar asociado con una disminución en el tamaño y menor calidad (Wells, 2011). Asimismo, el número de nueces por kilogramo es una característica cuantitativa e influye directamente en el peso (Smith, Wood, & Raun, 2007). De acuerdo con la NMX-FF-084-SCFI-2009, los valores encontrados corresponden al tamaño promedio de la nuez (171 a 210 nueces por kg).

Otra variable de calidad importante es el porcentaje de almendra comestible, dado que mantiene una relación directamente proporcional con el valor obtenido en el mercado, y es una característica valorada entre los productores de nuez (Flores-Córdova et al., 2018). En este estudio, los valores del porcentaje de nuez comestible fluctuaron entre 56.3 y 58.7, sin mostrar diferencia estadística por la dosis, la forma de aplicación del N o su interacción (Cuadro 2). Flores-Córdova et al. (2018) y Sánchez et al. (2009) obtuvieron resultados similares y, de acuerdo con la NMX-FF-084-SCFI-2009, el porcentaje de almendra obtenido se clasifica como excelente.

El aumento en el costo de los fertilizantes nitrogenados y la contaminación generada por su aplicación excesiva hace primordial el uso de indicadores como la EUN,

application, with 31.10 and 30.10 kg of nut produced per kg of N applied, respectively.

## Acknowledgments

The authors are grateful for the logistical and administrative support provided by *Sistema Producto Nuez* (Mexico) in carrying out this research.

## End of English version

## References / Referencias

- Acuña-Maldonado, L. E., Smith, M. W., Maness, N. O., Cheary, B. S., Carroll, B. L., & Johnson, G. V. (2003). Influence of nitrogen application time on nitrogen absorption, partitioning, and yield of pecan. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(2), 155-162. doi: 10.21273/JASHS.128.2.0155
- Castillo-González, J., Ojeda-Barrios, D., Hernández-Rodríguez, A., Abadía, J., Sánchez, E., Parra-Quezada, R., & Sida-Arriola, J. (2019). Zinc nutritional status of pecan trees influences physiological and nutritional indicators, the metabolism of oxidative stress, and yield and fruit quality. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 47(2) 531-538. doi: 10.15835/nbha47211389
- Fernández, V., del Río, V., Abadía, J., & Abadía, A. (2006). Foliar iron fertilization of peach (*Prunus persica* (L.) Batsch): effects of iron compounds, surfactants and other adjuvants. *Plant and Soil*, 289(1-2), 239-252. doi: 10.1007/s11104-006-9132-1
- Flores-Córdova, M. A., Soto-Parra, J. M., Javier-Piña, F., Pérez-Leal, R., & Sánchez-Chávez, E. (2018). Contribución de nutrientes, enmiendas orgánicas y micorrizas, sobre los componentes de rendimiento en nogal pecanero (*Carya illinoensis*). *Cultivos Tropicales*, 39(1), 35-42. Retrieved from <http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v39n1/ctr04118.pdf>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *Food and agriculture data (FAOSTAT)*. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Heerema, R. J., VanLeeuwen, D., Thompson, M. Y., Sherman J. D., Comeau, M. J., & Walworth, J. L. (2017). Soil-application of Zinc-EDTA increases leaf photosynthesis of immature 'Wichita' pecan trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 142(1), 27-35. doi: 10.21273/JASHS03938-16
- Martínez-Rodríguez, O. A., & Ávila-Ayala, M. (2002). Effect of ammonium sulfate on foliar concentration of nutrients, yield and quality of pecan walnut (*Carya illinoensis* Koch). *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 3(1), 19-24. Retrieved from [https://chapingo.mx/revistas/zonas\\_aridas/contenido.php?id\\_articulo=902&doi=0000&id\\_revista=8](https://chapingo.mx/revistas/zonas_aridas/contenido.php?id_articulo=902&doi=0000&id_revista=8)
- Medina-Morales, M. C. (2004). Normas DRIS preliminares para nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 445-450. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/573/57311096008.pdf>

la cual es una medida de la eficiencia productiva del cultivo de nogal pecanero (Sánchez et al., 2009). En este estudio, los datos fluctuaron entre 14.00 y 31.10 kg de nuez producida por kg de N aplicado, donde la aplicación total y la fraccionada de 100 kg·ha<sup>-1</sup> fueron estadísticamente más sobresalientes (31.10 y 30.10 kg de nuez producida por kg de N aplicado, respectivamente) (Cuadro 2). Lo anterior, en términos prácticos, indica la diferencia entre aplicar 100 o 200 kg·ha<sup>-1</sup>, que además de no afectar el rendimiento obtenido, sí representa un desembolso económico importante para el productor (Ojeda-Barrios et al., 2012; Wells, 2010). Sánchez et al. (2009) reportan valores de 16.91 kg de nuez producida por kg de N aplicado, esto con la aplicación fraccionada de 160 kg·ha<sup>-1</sup> de N en siete aplicaciones con base en la etapa fenológica de nogal 'Western Schley'.

## Conclusiones

La dosis y la forma de aplicación del N no afectaron la concentración foliar de N total, P, K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup> y Cu<sup>2+</sup>. Se detectó interacción significativa entre factores para la concentración de Zn<sup>2+</sup> y la dosis de 200 kg·ha<sup>-1</sup> de N aplicada en forma total, al incrementar de manera significativa la concentración foliar de este nutriente a 39.7 g·kg<sup>-1</sup>. Con la aplicación de 100 kg·ha<sup>-1</sup> de N en forma total, se observaron los valores más altos de rendimiento (44.60 kg·árbol<sup>-1</sup>) y nueces por kilogramo (194.8), mientras que el porcentaje de almendra se mantuvo sin cambios. La máxima eficiencia de uso del nitrógeno se obtuvo con la dosis de 100 kg·ha<sup>-1</sup> en forma total o fraccionada, con 31.10 y 30.10 kg de nuez producida por kg de N aplicado, respectivamente.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo logístico y administrativo proporcionado por el Sistema Producto Nuez Chihuahua (México) en la realización de esta investigación.

## Fin de la versión en español

- Ojeda-Barrios, D. L., Abadía, J., Lombardini, L., Abadía, A., & Vázquez, S. (2012). Zinc deficiency in field grown pecan trees: changes in leaf nutrient concentrations and structure. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(8), 1672-1678. doi: 10.1002/jsfa.5530
- Ojeda-Barrios D. L., Perea-Portillo, E., Hernández-Rodríguez, O. A., Ávila-Quezada, G., Abadía, J., & Lombardini, L. (2014). Foliar fertilization with zinc in pecan trees. *HortScience*, 49(5), 562-566. doi: 10.21273/HORTSCI.49.5.562
- Pond, A. P., Walworth, J. L., Kilby, M. W., Gibson, R. D., Call, R. E., & Núñez, H. (2006). Leaf nutrient levels for

- pecans. *HortScience*, 41(5), 1339-1341. doi: 10.21273/HORTSCI.41.5.1339
- Retes-López, R., Nasaimea-Palafox, A. R., Moreno-Medina, S., Denogean-Ballesteros, F. G., & Martín-Rivera, M. (2014). Análisis de rentabilidad del cultivo de nogal pecanero en la costa de Hermosillo. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 18(34), 872-882. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/141/14131514021.pdf>
- Sánchez, E., Soto, J. M., Sosa-Cerecedo, M., Yáñez, R. M., Muñoz, E., & Anchondo, Á. (2009). Eficiencia de uso del nitrógeno en nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 311-317. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v27n4/v27n4a5.pdf>
- SAS Institute Inc. (SAS). (2011). *SAS/ QC 9.3 User's Guide, version 9.3*. Cary, N.Y., USA: Author. Retrieved from <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/qcug/63964/PDF/default/qcug.pdf>
- Secretaría de Economía. (2009). *Norma Oficial Mexicana NMX-FF-084-SCFI-2009. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano - fruto fresco - nuez pecanera* *Carya illinoensis* (Wangenh) K. Koch - especificaciones y métodos de prueba. Retrieved January 22, 2019 from <http://comenueza.com/wp-content/uploads/2018/assets/nmx-ff-084-scfi-2009.pdf>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Retrieved from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Smith, M. W. (2010). Relationship of leaf necrosis and defoliation to phosphorus and potassium concentrations in selected tissue and to certain fruit quality parameters of pecan. *Scientia Horticulturae*, 125(2), 117-122. doi: 10.1016/j.scientia.2010.03.002
- Smith, M. W., & Cheary, B. S. (2013). Response of pecan to annual soil band applications of phosphorus and potassium. *HortScience*, 48(11), 411-415. doi: 10.21273/HORTSCI.48.11.1411
- Smith, M. W., Rohla, C. T., & Goff, W. D. (2012). Pecan leaf elemental sufficiency ranges and fertilizer recommendations. *HortTechnology*, 22(5), 594-599. doi: 10.21273/HORTTECH.22.5.594
- Smith, M. W., Wood, B. W., & Raun, W. R. (2007). Recovery and partitioning of nitrogen from early spring and midsummer applications to pecan trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 132(6), 758-763. doi: 10.21273/JASHS.132.6.758
- Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1995). *Biometry: The principles and practice of statistics in biological research*. New York, USA: W.H. Freeman.
- Soto-Parra, J. M., Piña-Ramírez, F. J., Sánchez-Chávez, E., Pérez-Leal, R., & Basurto-Sotelo, M. (2016). Alternativas orgánicas para disminuir la aplicación de nitrógeno en nogal pecanero. *Nova Scientia*, 8(16), 140-161. Retrieved from <http://novascientia.delasalle.edu.mx/ojs/index.php/Nova/article/view/413>
- Tarango-Rivero, S. H., Nevárez-Moorillón, V. G., & Orrantia-Borunda, E. (2009). Growth, yield, and nutrient status of pecans fertilized with biosolids and inoculated with rizosphere fungi. *Bioresource Technology*, 100(6), 1992-1998. doi: 10.1016/j.biortech.2007.12.078
- Walworth, J. L., White, S. A., Comeau, M. J., & Heerema, R. J. (2017). Soil-applied ZnEDTA: vegetative growth, nut production, and nutrient acquisition of immature pecan trees grown in an alkaline, calcareous soil. *HortScience*, 52(2), 301-305. doi: 10.21273/HORTSCI.11467-16
- Wells, M. L. (2010). *Nutritional, environmental, and cultural disorders of pecan*. USA: University of Georgia and Fort Valley State University.
- Wells, M. L. (2011). Nitrogen availability in pecan orchard soil: implications for pecan fertilizer management. *Hortscience*, 46(9), 1294-1297. doi: 10.21273/HORTSCI.46.9.1294
- Wood, B. W., Conner, P. J., & Worley, R. E. (2003). Relationship of alternate bearing intensity in pecan to fruit and canopy characteristics. *HortScience*, 38(3), 361-366. doi: 10.21273/HORTSCI.38.3.361
- Worley, P. J., & Worley, R. E. (2000). Alternate bearing intensity of pecan cultivars. *HortScience*, 35(6), 1067-1069. doi: 10.21273/HORTSCI.35.6.1067
- Zaragoza-Lira, M. M., Preciado-Rangel, P., Figueroa-Viramontes, U., García-Hernández, J. L., Fortis-Hernández, M., Segura-Castruita, M. A., Lagarda-Murrieta, A., & Madero-Tamargo, E. (2011). Aplicación de composta en la producción del nogal pecanero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(1), 33-37. doi: 10.5154/r.rchsh.2011.17.035
- Zhang, R., Peng, F., & Li, Y. (2015). Pecan production in China. *Scientia Horticulturae*, 197, 719-727. doi: 10.1016/j.scientia.2015.10.035

