

## Relación entre el níquel y elementos minerales en tres etapas fenológicas del nogal pecanero

### Relation between nickel and mineral elements in three phenological stages of pecan

Mónica Hernández-López<sup>1</sup> , Tania Elizabeth Velásquez-Chávez<sup>2</sup> , Mercedes Georgina Ramírez-Aragón<sup>2</sup> , Sergio Arturo Ortiz Díaz<sup>1</sup> , Pablo Preciado Rangel<sup>1</sup> , Alan Joel Servín-Prieto<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón - San Pedro de las Colonias km 7.5, Ejido Ana. CP. 27170. Torreón, Coahuila, México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico no. 1555 sur. CP. 35150 Periférico Gómez-Lerdo km 14.5. Cd. Lerdo, Durango, México.

\*Autor de correspondencia: alanjservin@gmail.com

#### Artículo científico

Recibido: 03 de enero 2026

Aceptado: 25 de julio 2026

**RESUMEN.** El níquel (Ni) es un micronutriente esencial para las plantas, cuya función en el nogal se relaciona con la activación de la enzima ureasa, previniendo la acumulación de urea y la aparición de manchas necróticas en las hojas. Este estudio evaluó la dinámica nutricional del cultivo ante la aplicación foliar de diferentes concentraciones de Ni, así como su efecto sobre el área foliar. Se empleó un diseño completamente al azar con cinco tratamientos (100, 150, 200 y 250 mg L<sup>-1</sup> de Ni, más un testigo sin aplicación) y cinco repeticiones. Se analizaron diez elementos minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Na y Ni) en tres etapas fenológicas: antes de la floración, crecimiento de frutos y estado acuoso de la nuez. Los resultados revelaron relaciones significativas entre Ni y los elementos N, P, Zn, Mn y Cu, especialmente durante el crecimiento de frutos, etapa en la que el aumento en la absorción de Ni inhibió la asimilación de dichos nutrientes. En contraste, el calcio mostró un incremento proporcional a las dosis de Ni aplicadas. No se observaron relaciones con K, Mg y Na. El área foliar presentó una tendencia creciente con el aumento de Ni, alcanzando un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) de 0.923. La dosis de 150 mg L<sup>-1</sup> resultó en el mayor valor de área foliar (321.29 cm<sup>2</sup>), sugiriendo un efecto positivo moderado del Ni sobre el desarrollo foliar del nogal.

**Palabras clave:** Dinámica, esencial, interacción, nutrientes, regresión.

**ABSTRACT.** Nickel (Ni) is an essential micronutrient for plants. In pecan trees, its function is related to the activation of the urease enzyme, preventing urea accumulation and the appearance of necrotic spots on the leaves. This study evaluated the crop's nutritional dynamics in response to foliar application of different Ni concentrations, as well as its effect on leaf area. A completely randomized design was used with five treatments (100, 150, 200, and 250 mg L<sup>-1</sup> of Ni, plus a control with no application) and five replicates. Ten mineral elements (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Na and Ni) were analyzed at three phenological stages: pre-flowering, fruit growth, and nut water content. The results revealed significant relationships between Ni and the elements N, Zn, Mn, and Cu, especially during fruit growth, a stage in which increased Ni uptake inhibited the assimilation of these nutrients. In contrast, calcium showed an increase proportional to the applied Ni doses. No relationships were observed with K, Mg and Na. Leaf area showed an increasing trend with increasing Ni, reaching a coefficient of determination (R<sup>2</sup>) of 0.923. The dose of 150 mg L<sup>-1</sup> resulted in the highest leaf area value (321.29 cm<sup>2</sup>), suggesting a moderate positive effect of Ni on walnut leaf development.

**Keywords:** Dynamics, essential, interaction, nutrients, regression.

**Como citar:** Hernández-López M, Velásquez-Chávez TE, Ramírez-Aragón MG, Ortiz-Díaz SA, Preciado-Rangel P, Servín-Prieto AJ (2026) Relación entre el níquel y elementos minerales en tres etapas fenológicas del nogal pecanero. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios Núm. Esp. VI: e5008. DOI: 10.19136/era.a13nVI.5008.

## INTRODUCCIÓN

La nuez pecana en México es una actividad de gran relevancia económica para el país, con una producción de 72 557 toneladas anuales, donde las cinco principales entidades productoras de nuez en el país fueron: Chihuahua, con 62.9%; Sonora, 14.3%; Coahuila, 10.7% (SIAP 2021). Desde el 2004, el (Ni) es considerado un micronutriente esencial para las plantas por la Asociación Americana para el Control de Nutrientes Vegetales (Hassan 2019). El Ni ha representado un micronutriente de gran importancia debido a su participación en el metabolismo de los aminoácidos y del carbono (Zhang *et al.* 2023); participa en el funcionamiento de enzimas involucradas en la fijación biológica del nitrógeno como la ureasa, nitrogenasa e hidrogenasa, por ello, concentraciones bajas de nivel de Ni en suelos disminuye la fijación simbiótica de N en algunos cultivos (Moretti *et al.* 2026). En años recientes se han observado altas deficiencias de Ni, que han manifestado problemas agronómicos y alteraciones morfológicas en el follaje, manifestando un síntoma conocido como oreja de ratón (Martínez-Soto *et al.* 2023). Este síntoma genera una necrosis de las puntas de los folíolos, ocasionando que sean pequeños y redondeados, disminuyendo el área foliar y el rendimiento del árbol (Cruz-Álvarez *et al.* 2020). Mientras que Brown *et al.* (2024) señalan que la deficiencia de Ni en los cultivos puede originarse por concentraciones elevadas de Cu y Zn, que compiten con el Ni e inhiben su absorción por las raíces. Asimismo, la acumulación de Cu en tejidos vegetales puede inhibir la actividad de la ureasa, aumentando los efectos fisiológicos de la deficiencia (Khan y Al-Harbi 2026). Investigaciones recientes realizadas por Hernández-Delgado *et al.* (2025), demuestran que valores de pH superiores a 6.5 favorecen la presencia de óxidos metálicos en la rizosfera y concentraciones elevadas de Fe, Mn, Ca y Mg reducen la disponibilidad del micronutriente. Otro estudio realizado por Oliveira *et al.* (2022) demuestra que las concentraciones elevadas de fósforo incrementan la formación de fosfatos de Ni, y además, inhiben la enzima ureasa debido a la acumulación de Cu en los tejidos vegetales.

Por su parte, un estudio reciente de Becerra *et al.* (2023), que evaluó la aplicación foliar de níquel en plántulas de nogal pecanero con deficiencia severa, identificó que una concentración de 100 mg L<sup>-1</sup> es la más eficaz para corregir la carencia. Esta dosis favoreció una absorción rápida del níquel a través de la vena principal y su redistribución hacia las venas secundarias, además de provocar un aumento de gran relevancia en la actividad de la ureasa. Frente a este escenario, se han implementado nuevas estrategias de manejo nutricional para evaluar y corregir las deficiencias de Ni en nogal pecanero. Diversos estudios han comprobado que la aplicación foliar de Ni en concentraciones adecuadas puede restablecer la actividad enzimática y mejorar la redistribución del micronutriente en el tejido foliar, siendo una alternativa eficaz para mitigar los efectos de la carencia (Becerra *et al.* 2023, Oliveira *et al.* 2024). Debido a que algunas deficiencias de Ni son producto del incremento o disminución de ciertos nutrientes presentes en el suelo, el objetivo artículo es evaluar el comportamiento nutricional de la fertilización con níquel en nogal Pecanero y evaluar el impacto de éste en el área foliar para determinar la dosis más apta para este cultivo y que el aporte de los nutrientes sea más efectivo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

Este estudio se llevó a cabo en el municipio de Matamoros, Coahuila, México, en las coordenadas geográficas 25° 20' 28" LN y 102° 48' 16" LO. En la pequeña propiedad denominada Tierra Blanca. El suelo presenta un pH de 7.4, una textura arcillo-limosa, 2.4% de materia orgánica. El tipo de clima se clasifica como BWh, seco y semicálido a cálido extremo, con temperaturas superiores a los 40°C, e inviernos frescos a fríos. Con una precipitación anual que ronda en 250 a 260 mm.

Los árboles evaluados pertenecen a la variedad Squirrel Delight y tienen una edad de 63 años. El sistema de plantación corresponde a un marco de 14 × 14 m, lo que equivale a una densidad de 50 árboles ha<sup>-1</sup>. El riego del huerto se llevó a cabo mediante un sistema de goteo con cintilla instalado a 40 cm de profundidad, lo que permitió una distribución eficiente del agua en la zona radicular activa. La lámina total aplicada durante el ciclo anual fue de 120 cm, suministrada de manera programada desde el 1 de marzo hasta el 15 de octubre.

### Diseño experimental

Se utilizó un diseño completamente al azar con cinco tratamientos: cuatro dosis de níquel (Ni) en concentraciones de 100, 150, 200 y 250 mg L<sup>-1</sup>, y un testigo sin aplicación. Cada tratamiento contó con cinco repeticiones. Las evaluaciones se realizaron en tres etapas fenológicas del cultivo: antes de la floración (AF, 20 de abril), durante el crecimiento de frutos (CF, 9 de mayo) y en la etapa acuosa de la nuez (EAN, 24 de junio). Se seleccionaron 25 árboles ubicados en la zona media del huerto para la aplicación de los tratamientos siendo cada árbol una unidad experimental.

Las aplicaciones foliares se llevaron a cabo con una aspersora UNIGREEN AIRDROP T20C. CARBO 153.MOV, utilizando el fertilizante comercial Speedfol® Pecano SP (SQM), con una concentración de 5.4% de Ni en forma de óxido (NiO), N 5%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2%, K<sub>2</sub>O 18% y MgO 4.2%, operada durante el turno matutino entre las 8:00 y las 10:00 h para asegurar condiciones ambientales favorables. Se cubrió por completo el follaje en cada una de las aspersiones hasta alcanzar el punto de rocío, garantizando una adecuada deposición de la mezcla. Todas las soluciones incluyeron un ion transportador que fue 0.1% de urea y un agente tensioactivo que fue 0.02% de Tween 20. Se ajustó el pH de las mezclas con ácido sulfúrico para mantenerlo dentro del intervalo óptimo de 6.0 a 6.5, favoreciendo la estabilidad y absorción de los compuestos aplicados.

### Muestreo foliar y análisis nutrimental

Los muestreos foliares se realizaron 15 días posteriores a cada aplicación de tratamiento. Se tomaron muestras de los cuatro puntos cardinales de la parte media de la copa, seleccionando el tercer par de folíolos de brotes representativos. Por cada árbol se recolectaron 80 folíolos, seleccionados de manera aleatoria en la zona media de la copa. Algunos de estos folíolos presentaban síntomas visibles de oreja de ratón. Las muestras se lavaron inicialmente con agua de grifo y después con agua desionizada para eliminar residuos superficiales. Después se secaron en una estufa de circulación de aire forzado (STF 720) a 60 °C, y una vez deshidratadas, se molieron y tamizaron para su posterior análisis químico. Posteriormente, se analizaron los siguientes elementos nutricionales: Nitrógeno (N), mediante el método de Kjeldahl. Fósforo (P), por espectroscopía UV-Vis según Jones (2017). Calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), zinc (Zn),

manganeso (Mn), níquel (Ni) y cobre (Cu), mediante espectroscopía de absorción atómica (Perkin Elmer AA700). Las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelo, Agua y Plantas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Matamoros, Coahuila.

### Determinación de área foliar

Para la determinación del área foliar se utilizó un medidor portátil de la marca Li-Cor® modelo LI-3000. Una vez finalizadas las aplicaciones de los tratamientos, se seleccionaron 25 hojas de cada árbol.

### Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de regresión con la finalidad de identificar la relación entre las variables evaluadas y determinar los modelos que mejor describen el comportamiento observado en el estudio.

## RESULTADOS

### Concentraciones foliares de níquel en diferentes etapas fenológicas del nogal pecanero

En la Tabla 1 se observa que conforme aumentan las dosis de Ni, las concentraciones foliares también se incrementan, lo que evidencia una absorción efectiva del nutriente. No obstante, este incremento no sigue un patrón lineal: después de la dosis de 200 mg L<sup>-1</sup> se registra una disminución antes de la floración, lo que sugiere la presencia de un posible umbral fisiológico o un punto de saturación en la absorción. En esta etapa se presenta la mayor acumulación foliar de Ni, obteniendo 57 mg kg<sup>-1</sup> con la dosis de 200 mg L<sup>-1</sup>; sin embargo, a 250 mg L<sup>-1</sup> ocurre una caída notable, lo que podría indicar saturación en los mecanismos de absorción o la manifestación de estrés por exceso de Ni.

**Tabla 1.** Concentración foliar de níquel en diferentes etapas fenológicas del nogal pecanero

| Dosis de Ni<br>mg L <sup>-1</sup> | Etapa fenológica del nogal                            |                       |                          |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------|
|                                   | Antes de la floración                                 | Crecimiento de Frutos | Estado acuoso de la Nuez |
|                                   | Concentraciones foliares de Ni<br>mg kg <sup>-1</sup> |                       |                          |
| 0                                 | 4.77                                                  | 7.51                  | 3.02                     |
| 100                               | 29.02                                                 | 14.05                 | 10.26                    |
| 150                               | 49.15                                                 | 17.21                 | 12.26                    |
| 200                               | 57.00                                                 | 21.59                 | 13.81                    |
| 250                               | 43.17                                                 | 25.02                 | 19.05                    |

Durante la etapa de crecimiento de frutos, la acumulación foliar de Ni es progresiva y relativamente constante (Tabla 1), posiblemente asociada con mayor demanda metabólica durante el llenado del fruto. Por otro lado, en la etapa de estado acuoso de la nuez se observan menores concentraciones foliares de Ni, lo cual es esperable debido a procesos de dilución del nutriente y a su redistribución hacia los órganos reproductivos. A diferencia de la etapa inicial, en esta fase las concentraciones

foliares continúan aumentando incluso con la dosis de 250 mg L<sup>-1</sup>, lo que sugiere que el tejido aún mantiene capacidad de acumulación sin evidenciar saturación fisiológica evidente.

### Análisis de regresión de Ni con macronutrientes en tres etapas fenológicas del nogal

En la Tabla 2 se evidencia una relación inversa significativa en las dosis aplicadas de Ni y la concentración foliar de N durante las etapas fenológicas previas a la floración, así como en el crecimiento de frutos y en el estado acuoso de la nuez. Este comportamiento sugiere que el incremento en la disponibilidad de Ni podría estar interfiriendo con la absorción o asimilación del N en el tejido foliar. Los coeficientes de determinación obtenidos (0.9746, 0.937 y 0.8402, respectivamente) confirman la solidez de esta tendencia, indicando que una proporción considerable de la variabilidad en la concentración de N puede explicarse por las dosis crecientes de Ni.

**Tabla 2.** Coeficiente de determinación R<sup>2</sup> de los macronutrientes con aplicaciones de Ni en tres etapas fenológicas del nogal.

| Elemento                        | Ecuación de regresión              | R <sup>2</sup> |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------|
| <b>Antes de la floración</b>    |                                    |                |
| N                               | $y = 3E-05x^2 - 0.0099x + 3.6101$  | 0.9746         |
| P                               | $y = 2E-06x^2 - 0.0008x + 0.1688$  | 0.9804         |
| K                               | $y = -1E-05x^2 + 0.0039x + 1.458$  | 0.4115         |
| Ca                              | $y = -5E-06x^2 + 0.0031x + 0.6089$ | 0.8798         |
| Mg                              | $y = 2E-06x^2 - 0.0007x + 0.3888$  | 0.5014         |
| <b>Crecimiento de frutos</b>    |                                    |                |
| N                               | $y = 2E-05x^2 - 0.0092x + 3.5789$  | 0.937          |
| P                               | $y = 2E-06x^2 - 0.0008x + 0.1688$  | 0.9731         |
| K                               | $y = -1E-05x^2 + 0.0022x + 1.6361$ | 0.384          |
| Ca                              | $y = -4E-06x^2 + 0.0027x + 0.5924$ | 0.9434         |
| Mg                              | $y = 2E-06x^2 - 0.0007x + 0.4045$  | 0.6784         |
| <b>Estado acuoso de la nuez</b> |                                    |                |
| N                               | $y = 2E-05x^2 - 0.0074x + 2.6901$  | 0.8402         |
| P                               | $y = 2E-06x^2 - 0.0008x + 0.1688$  | 0.9756         |
| K                               | $y = 5E-06x^2 - 0.0013x + 1.281$   | 0.471          |
| Ca                              | $y = -3E-05x^2 + 0.0117x + 0.6337$ | 0.9846         |
| Mg                              | $y = 3E-06x^2 - 0.0004x + 0.2956$  | 0.4473         |

El fósforo (P) mostró una relación significativa con las dosis de Ni en todas las etapas fenológicas evaluadas (Tabla 2). Los coeficientes de determinación indican una fuerte asociación entre ambas variables, con valores de R<sup>2</sup> = 0.9804 en la etapa antes de la floración, R<sup>2</sup> = 0.9731 durante el crecimiento de frutos y R<sup>2</sup> = 0.9731 en el estado acuoso de la nuez. Estos resultados evidencian una respuesta consistente del P frente al incremento en las dosis de Ni, independientemente de la etapa de desarrollo.

En el caso del calcio (Ca), se identificaron relaciones positivas y altamente significativas con las dosis de Ni en todas las etapas fenológicas evaluadas. La mayor capacidad explicativa se registró durante el estado acuoso de la nuez, con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> = 0.9846. Le siguió

la etapa de crecimiento de frutos, con  $R^2 = 0.9434$ , y finalmente la etapa previa a la floración, donde se obtuvo un valor de  $R^2 = 0.8798$ . Estos resultados indican que el incremento en las dosis de Ni se asocia consistentemente con un aumento en la concentración foliar de Ca, particularmente marcado en las etapas reproductivas avanzadas. Finalmente, se presenta una baja relación entre K, Mg y Ni en ninguna de las etapas fenológicas del cultivo de nogal (Tabla 2).

### Análisis de regresión de Ni con micronutrientes en tres etapas fenológicas del nogal

En la Tabla 3 se observa que el Zn mostró la respuesta más consistente frente al incremento de las dosis de Ni a lo largo del ciclo fenológico. Antes de la floración y crecimiento de frutos, las regresiones presentaron valores elevados ( $R^2 = 0.9495$  y  $R^2 = 0.9521$ , respectivamente), lo que indica una fuerte dependencia del Zn respecto al Ni durante las fases tempranas y medias del desarrollo. En el estado acuoso de la nuez, el ajuste disminuyó ( $R^2 = 0.6362$ ), lo que indica que la influencia del Ni sobre el Zn se atenúa conforme el fruto avanza hacia la madurez fisiológica.

**Tabla 3.** Coeficiente de determinación  $R^2$  de los micronutrientes con aplicaciones de Ni en tres etapas fenológicas del nogal.

| Elemento                        | Ecuación de regresión               | $R^2$  |
|---------------------------------|-------------------------------------|--------|
| <b>Antes de la floración</b>    |                                     |        |
| Zn                              | $y = 0.0035x^2 - 1.201x + 226.79$   | 0.9495 |
| Mn                              | $y = -3E-05x^2 + 0.0089x + 92.754$  | 0.0617 |
| Na                              | $y = -1E-05x^2 + 0.0039x + 1.458$   | 0.4115 |
| Cu                              | $y = -0.0001x^2 + 0.0226x + 13.312$ | 0.6215 |
| <b>Crecimiento de frutos</b>    |                                     |        |
| Zn                              | $y = 0.0011x^2 - 0.4907x + 211.75$  | 0.9521 |
| Mn                              | $y = 0.0028x^2 - 1.121x + 171.65$   | 0.9845 |
| Na                              | $y = -1E-05x^2 + 0.0022x + 1.6361$  | 0.384  |
| Cu                              | $y = 3E-05x^2 - 0.0118x + 14.971$   | 0.9632 |
| <b>Estado acuoso de la nuez</b> |                                     |        |
| Zn                              | $y = 0.0016x^2 - 0.4289x + 131.39$  | 0.6362 |
| Mn                              | $y = -0.0003x^2 - 0.0322x + 56.972$ | 0.7698 |
| Na                              | $y = 5E-06x^2 - 0.0013x + 1.281$    | 0.471  |
| Cu                              | $y = 0.0002x^2 - 0.0934x + 20.548$  | 0.8988 |

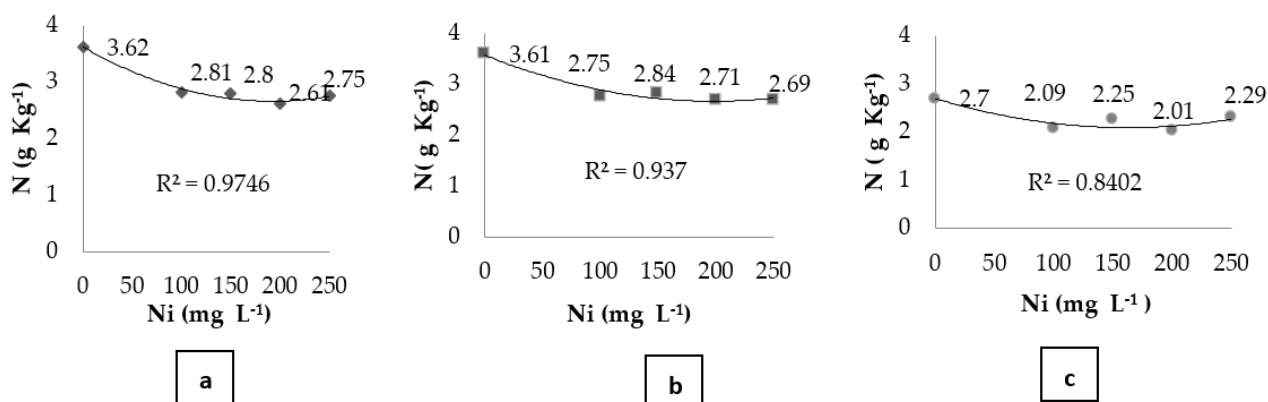
El Mn mostró un comportamiento dependiente de la etapa fenológica (Tabla 3). Antes de la floración, la relación con las dosis de Ni fue prácticamente nula ( $R^2 = 0.0617$ ), indicando estabilidad en su concentración foliar y ausencia de respuesta al Ni. Sin embargo, durante el crecimiento de frutos y el estado acuoso de la nuez, el Mn presentó relaciones significativas ( $R^2 = 0.7847$  y  $R^2 = 0.7356$ , respectivamente), lo que evidencia una mayor sensibilidad al Ni en etapas reproductivas.

También se observa que el Na mostró relaciones débiles con las dosis de Ni en todas las etapas fenológicas evaluadas, con valores de  $R^2$  entre 0.38 y 0.47. Este comportamiento indica que la variación del Na no está determinada por el incremento de Ni y que su concentración foliar responde principalmente a factores independientes, posiblemente relacionados con su alta movilidad, su papel osmótico o variaciones ambientales.

Para Cu se observa en la Tabla 3 un patrón progresivo de sensibilidad al Ni conforme avanzó el desarrollo del fruto. En la etapa antes de la floración, la relación fue moderada ( $R^2=0.6215$ ), mientras que durante el crecimiento de frutos se mantuvo en un nivel similar ( $R^2=0.9632$ ). Sin embargo, en el estado acuoso de la nuez, el Cu presentó una ligera disminución del nivel de ajuste ( $R^2=0.8988$ ), indicando una fuerte asociación con las dosis de Ni en la fase de crecimiento de fruto.

### Nitrógeno (N)

En la Figura 1a se evidencia una relación inversa entre las dosis de Ni y la concentración de N durante la etapa fenológica previa a la floración. Conforme aumenta la dosis de Ni, la concentración de N disminuye, pasando de  $3.62 \text{ g kg}^{-1}$  a  $2.75 \text{ g kg}^{-1}$  en la dosis más alta ( $250 \text{ mg L}^{-1}$  de Ni). Un comportamiento similar se observa en la etapa de crecimiento de frutos (Figura 1b), donde el valor de N disminuye de  $3.61$  a  $2.69 \text{ g kg}^{-1}$ .



**Figura 1.** Gráficas de regresión de nitrógeno con dosis de níquel en a) etapa antes de floración, b) etapa de crecimiento de frutos, c) etapa estado acuoso de la nuez.

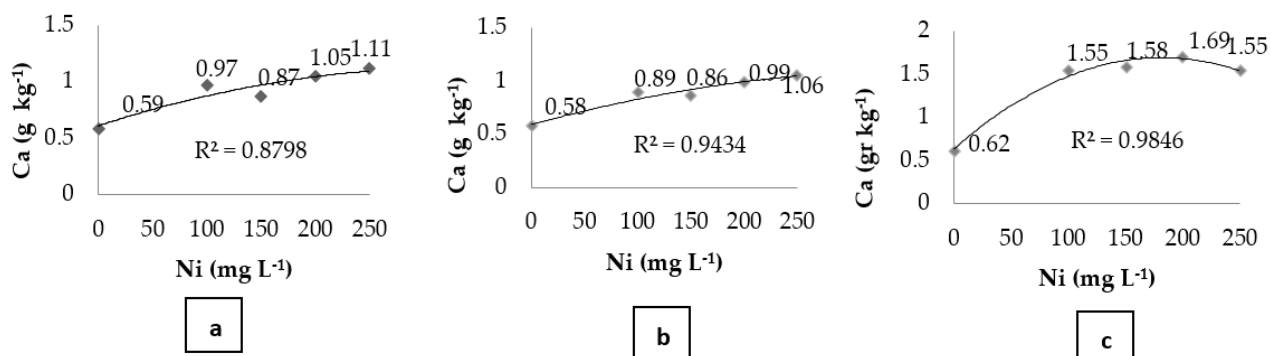
En contraste, en la etapa de estado acuoso de la nuez (Figura 1c) las concentraciones de N en hoja muestran escasa variación, disminuyendo de  $2.7$  a  $2.29 \text{ g kg}^{-1}$ , sin evidenciar una relación clara con las dosis de Ni.

### Calcio (Ca)

En la Figura 2c se aprecia una clara respuesta foliar del Ca conforme aumentan las concentraciones de Ni. Los valores iniciales ( $0.62 \text{ g kg}^{-1}$ ) se incrementan de manera sostenida hasta alcanzar aproximadamente  $1.69 \text{ g kg}^{-1}$  en las dosis intermedias-altas, lo que evidencia una relación ascendente consistente entre ambos elementos. Aunque en la dosis más alta evaluada se observa una ligera disminución ( $1.55 \text{ g kg}^{-1}$ ), el patrón general mantiene un comportamiento positivo y un ajuste estadístico sobresaliente, lo que confirma que el Ni explica una proporción considerable de la variabilidad observada en la concentración foliar de Ca.

En las Figuras 2a y 2b, correspondientes a las etapas antes de la floración y crecimiento de fruto, se registran concentraciones foliares de Ca menores en comparación con la etapa de estado acuoso de la nuez. En estas dos primeras etapas, los valores mínimos se sitúan en  $0.58$  y  $0.59 \text{ g kg}^{-1}$ , mientras que los máximos alcanzan  $1.11$  y  $1.06 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente. A pesar de estas diferencias en magnitud, ambas figuras confirman la misma tendencia observada en la Figura 2c: las

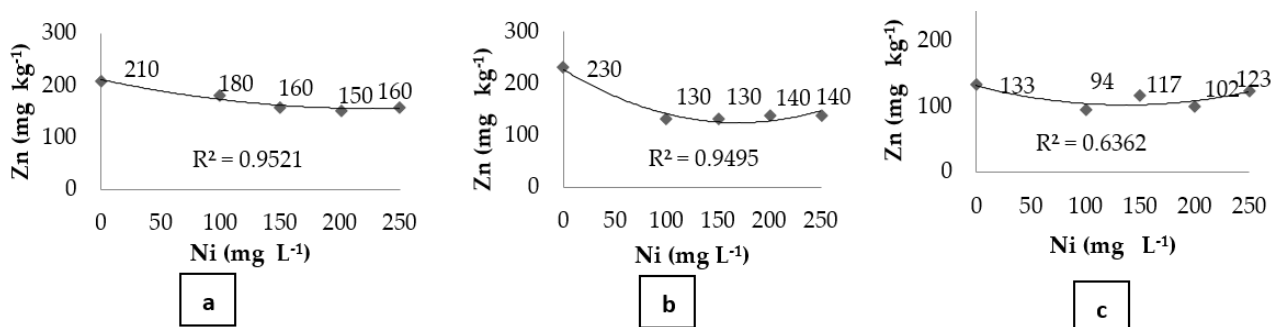
concentraciones de Ca aumentan conforme se incrementan las dosis de Ni, manteniendo un patrón positivo y consistente a lo largo del desarrollo fenológico.



**Figura 2.** Gráficas de regresión de calcio con dosis de níquel en a) etapa antes de floración, b) etapa de crecimiento de frutos, c) etapa estado acuoso de la nuez.

### Zinc (Zn)

En las Figuras 3a y 3b se muestra una relación inversa significativa entre las concentraciones foliares de Ni y Zn. En la etapa antes de la floración, el nogal presenta concentraciones iniciales de Zn cercanas a  $210 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que durante el crecimiento de frutos los valores iniciales ascienden a  $230 \text{ mg kg}^{-1}$ . Sin embargo, conforme aumentan las dosis de Ni, las concentraciones de Zn disminuyen progresivamente hasta alcanzar aproximadamente  $160 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $140 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. Este comportamiento confirma que el incremento de Ni ejerce un efecto depresivo sobre la acumulación foliar de Zn en ambas etapas.

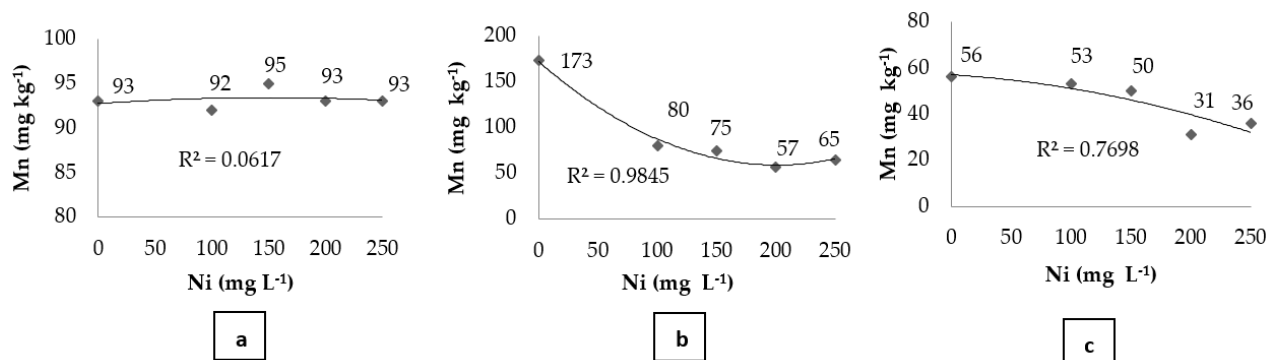


**Figura 3.** Gráficas de regresión de zinc con dosis de níquel en a) etapa antes de floración, b) etapa de crecimiento de frutos, c) etapa estado acuoso de la nuez.

Para el estado acuoso de la nuez, las concentraciones de Zn son notablemente más bajas en comparación con las etapas anteriores. En esta fase, los valores inician en  $133 \text{ mg kg}^{-1}$  en la dosis cero, disminuyen hasta  $94 \text{ mg kg}^{-1}$  con la aplicación de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  de Ni y posteriormente muestran un ligero incremento hasta  $123 \text{ mg kg}^{-1}$ . A pesar de esta recuperación parcial, la tendencia general sigue indicando una reducción del Zn foliar asociada al aumento de Ni, lo que sugiere una interacción negativa consistente entre ambos elementos a lo largo del desarrollo fenológico.

## Manganeso (Mn)

En la Figura 4a, correspondiente a la etapa previa a la floración, no se observa una relación significativa entre las dosis de níquel (Ni) y las concentraciones de manganeso (Mn). Sin embargo, durante el crecimiento de frutos (Figura 4b), se muestra una marcada relación inversa, donde las concentraciones de Mn disminuyen de 173 a 57 mg kg<sup>-1</sup> conforme aumentan las dosis de Ni, con un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> = 0.9845.

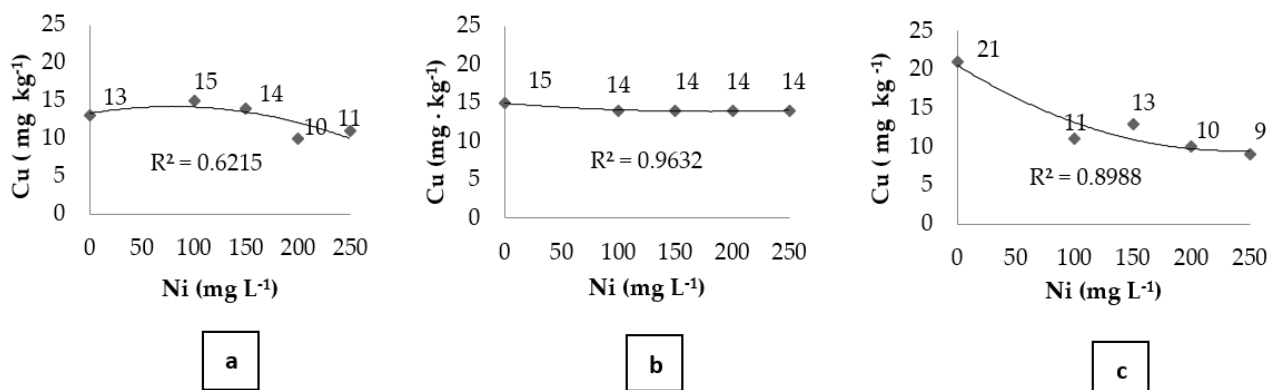


**Figura 4.** Gráficas de regresión de manganeso con dosis de níquel en a) etapa antes de floración, b) etapa de crecimiento de frutos, c) etapa estado acuoso de la nuez.

Una tendencia similar se observa en el estado acuoso de la nuez (Figura 4c), en la cual las concentraciones de Mn descienden de 56 a 31 mg kg<sup>-1</sup>, manteniéndose una relación inversa con las dosis de Ni (R<sup>2</sup> = 0.7698).

## Cobre (Cu)

Durante la etapa previa a la floración (Figura 5a) no se observa una relación significativa respecto a las concentraciones de Cu y el aumento en las dosis de Ni. En la segunda etapa de crecimiento de fruto, las concentraciones de Cu se mantuvieron constantes en todas las dosis, obteniendo 14 mg kg<sup>-1</sup> como promedio.

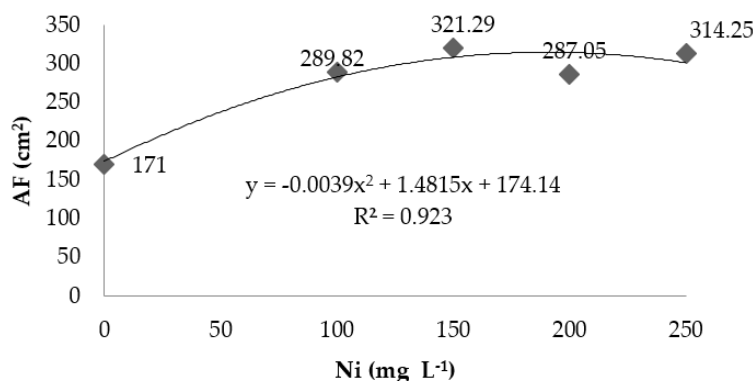


**Figura 5.** Relación de cobre con dosis de níquel en a) etapa antes de floración, b) etapa de crecimiento de frutos, c) etapa estado acuoso de la nuez.

En contraste, en el estado acuoso de la nuez (Figura 5c), se presenta una relación inversa clara, donde las concentraciones de Cu disminuyen de 21 a 9 mg kg<sup>-1</sup> a medida que aumentan las dosis de Ni, con un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> = 0.8988.

### Área Foliar (AF)

En la Figura 6 se muestra una relación positiva con el área foliar (AF) y las dosis de níquel (Ni). En las plantas con deficiencia de Ni (dosis nula), el área foliar fue de 171 cm<sup>2</sup>, mientras que, con el incremento de las dosis, se registró un aumento progresivo, alcanzando una superficie máxima de 321.29 cm<sup>2</sup> con la aplicación de 150 mg L<sup>-1</sup> de Ni. Esta relación muestra un coeficiente de determinación de R<sup>2</sup> = 0.923, lo que denota un efecto estimulante del Ni en el desarrollo foliar.



**Figura 6.** Relación de área foliar (AF) con aplicaciones de níquel en nogal Pecanero.

## DISCUSIÓN

### Níquel (Ni)

Las concentraciones foliares de Ni mostraron un incremento con las dosis aplicadas, especialmente antes de la floración y durante el crecimiento del fruto. Este comportamiento coincide con lo reportado por Zhang *et al.* (2024), quienes encontraron que las aplicaciones foliares de Ni incrementan de manera significativa las concentraciones foliares del elemento, haciendo evidente la alta movilidad y eficiencia de absorción en árboles perenes. El hecho de que las concentraciones sean mayores durante el crecimiento del fruto y menores en el estado acuoso coincide con la dinámica estacional descrita por Moran-Durán *et al.* (2020), quienes observaron fluctuaciones en la respuesta fisiológica al Ni dependiendo del momento del ciclo y de la interacción con el nitrógeno.

De acuerdo con las concentraciones foliares de Ni registradas en los tratamientos testigo para las tres etapas fenológicas, antes de la floración (4.77 mg kg<sup>-1</sup>), crecimiento de fruto (7.51 mg kg<sup>-1</sup>) y estado acuoso (3.02 mg kg<sup>-1</sup>), los valores se ubican dentro o ligeramente por encima del rango de suficiencia señalado por Acevedo-Barrera *et al.* (2022) y Moran-Durán *et al.* (2020). Esto indica que el cultivo no presentaba una deficiencia marcada de Ni al inicio del experimento.

Las dosis de 100 y 250 mg L<sup>-1</sup> generaron acumulaciones foliares elevadas de Ni, pero dentro de rangos considerados seguros y fisiológicamente aceptables, ya que incluso concentraciones

cercanas a  $57 \text{ mg kg}^{-1}$  no han sido asociadas con efectos negativos en estudios recientes (Acevedo-Barrera *et al.* 2022).

### Nitrógeno (N)

También se observó que, en las etapas fenológicas previas a la floración y durante el crecimiento de los frutos, el incremento en la dosis de níquel (Ni) disminuye la concentración de nitrógeno (N). Algunos estudios recientes indican que el Ni puede interferir con la absorción de N al competir por transportadores o alterar la expresión de proteínas involucradas en la asimilación de nitratos y amonio, ya que el Ni puede inhibir la actividad del nitrato reductasa, una enzima clave en la conversión de nitrato y nitrito, reduciendo así la asimilación de N (Rizwan *et al.* 2022). Por otra parte, esta reducción en el N foliar se atribuye al aumento del área foliar inducido por el Ni (Figura 6), lo que diluye su concentración, ya que en condiciones de deficiencia de Ni el área foliar suele ser reducida (Shahzad *et al.* 2018). En la etapa de estado acuoso de la nuez, la concentración de N también disminuye, esto se debe al llenado del fruto que inicia en la fase acuosa, donde genera una fuerte demanda de N, reduciendo su concentración en hojas, incluso cuando la fertilización es adecuada (Wells 2021). Este comportamiento coincide con lo reportado por Pokhrel *et al.* (2025), quienes señalan que durante el desarrollo del fruto, especialmente en la fase de expansión rápida y llenado, el pecanero remobiliza N desde los tejidos vegetativos hacia la nuez, convirtiendo al fruto en el principal destino de los nitratos y reduciendo de manera natural la concentración foliar del nutriente. Dado que el N es un macronutriente esencial para el rendimiento del nogal, resulta fundamental considerar tanto las etapas fenológicas clave para su aplicación como las cantidades adecuadas, siendo la primavera especialmente durante la floración y el cuaje de frutos el periodo más crítico (González-Gutiérrez *et al.* 2022). Cabe señalar que, en estas fases, el N proviene principalmente de las reservas acumuladas el año anterior, por lo que es indispensable garantizar su disponibilidad hacia finales del verano.

### Calcio (Ca)

El aumento en las concentraciones de Ca se atribuye al antagonismo entre Ni y Mn, ya que el incremento de Ni reduce los niveles de Mn y favorece la acumulación de Ca en el tejido vegetal (Bhar *et al.* 2023). Las concentraciones de Ca obtenidas en este estudio coinciden con los reportado por López-Hernández *et al.* (2022), quienes encontraron rangos de  $1.2$  a  $2.3 \text{ g kg}^{-1}$  en nogal.

### Fosforo (P)

Mientras que, P mostró una relación altamente significativa con las dosis de Ni (en todas las etapas). Algunos estudios han mostrado que la disponibilidad de P en tejidos vegetales puede verse modulada por la presencia de metales traza, incluidos aquellos considerados esenciales en bajas concentraciones, como el Ni (Álvarez-Moreno *et al.* 2021).

### Potasio (K)

No se detectó relación entre Ni y K, probablemente debido a la alta disponibilidad natural de K en los suelos calcáreos de la región (Maathuis 2009).

### Magnesio (Mg)

Magnesio mostró una  $R^2=0.67$ , lo cual se considera poco significativa, sin embargo se debe asegurar las dosis adecuadas de este macroelemento, debido a que constituye el núcleo central de la molécula de clorofila (Fischer *et al.* 2016).

### Zinc (Zn)

El Zn presentó la respuesta más confiable conforme el incremento de las dosis de Ni, en las etapas de floración y crecimiento de fruto. Esta fuerte interacción sugiere que el Ni influye de manera directa en la disponibilidad, movilidad o acumulación del Zn en fases tempranas del desarrollo, mientras que dicha influencia disminuye conforme el fruto avanza hacia la madurez fisiológica, como lo indica el menor ajuste en el estado acuoso de la nuez. Este comportamiento es avalado por Khan *et al.* (2020) quienes encontraron que el Ni puede interferir en la absorción y translocación del Zn al modificar la actividad de transportadores metálicos y la asimilación de proteínas asociadas al estrés oxidativo. Esto demuestra una fuerte dependencia en las etapas iniciales, donde la demanda de Zn es elevada debido a los procesos de división celular y a la formación de estructuras reproductivas (Estrada-Arellano *et al.* 2023). Dichas concentraciones se relacionan con la presencia de Zn en el mes de Julio y al intenso crecimiento del nogal en esas fechas (Ojeda- Barrios *et al.* 2009). Algunas investigaciones actuales han encontrado que la acumulación de Zn en tejidos reproductivos tiende a estabilizarse o incluso disminuir conforme avanza la madurez del fruto, esto se debe a la redistribución interna de nutrientes y a la prioridad de otros elementos esenciales para el llenado y endurecimiento del fruto (Xie *et al.* 2020). Este evento explicaría la disminución de la relación Zn-Ni en la etapa de estado acuoso de la nuez; sin embargo, aún con esta disminución, los valores de Zn se encuentran ligeramente por encima del rango de suficiencia que oscilan entre 50 y 100 mg kg<sup>-1</sup> (Pokhrel *et al.* 2025).

### Manganeso (Mn)

En cuanto al Mn, se observó una disminución en las etapas de crecimiento de frutos y estado acuoso de la nuez. Esta interacción se explica porque el Mn y el Ni comparten el mismo número de oxidación (+2) y se ubican en el mismo periodo de la tabla periódica, presentando propiedades fisicoquímicas similares (Briceño *et al.* 2020). El antagonismo directo entre Ni y Mn se debe a la competencia por los mismos sitios de absorción. Además, los suelos calcáreos de la región, con pH superiores a 6, reducen aún más la absorción de Mn<sup>2+</sup> (González-Gutiérrez *et al.* 2022). A pesar de la disminución observada, las concentraciones foliares de Mn se mantienen dentro del rango de suficiencia reportado para el cultivo 50-100 mg kg<sup>-1</sup> (Piedra y Ávila 2008).

### Cobre (Cu)

El Cu mostró un comportamiento similar, con relaciones inversas significativas en las etapas de crecimiento de frutos y estado acuoso de la nuez. Dado que tanto el Cu<sup>2+</sup> como el Ni<sup>2+</sup> son absorbidos por mecanismos semejantes, compiten por los mismos sitios de absorción. Las concentraciones foliares de Cu disminuyeron con el aumento de Ni, aunque se mantuvieron dentro del rango adecuado para el cultivo (Villegas *et al.* 2015). El cobre es esencial en procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis, la respiración y la respuesta al estrés oxidativo, es por eso, que las concentraciones tienen que ser monitoreadas para evitar una deficiencia con aplicaciones de Ni

(Kilany *et al.* 2020). Los valores de Cu permanecieron dentro del rango de suficiencia reportado para el cultivo 10–30 mg kg<sup>-1</sup> (Salas-Rivera *et al.* 2018). Algunas investigaciones recientes sugieren que Cu, Mn y Zn compiten con el Ni por los sitios de absorción en raíces y hojas, por ello no es recomendable aplicar de manera simultánea estos micronutrientes junto con Ni en forma foliar (Ojeda-Barrios *et al.* 2022).

### Área Foliar (AF)

En cuanto al área foliar (AF), se observó que conforme se incrementan las concentraciones de Ni, el AF también se incrementa. Esto puede asociarse a la participación del Ni en procesos metabólicos esenciales, principalmente aquellos relacionados con la actividad de la ureasa y el metabolismo del nitrógeno (Siegbahn *et al.* 2019). Algunos estudios han mostrado similitud en los resultados en nogal, donde el uso de fertilizante de sulfato de níquel también incrementó significativamente el área foliar (Kamboj *et al.* 2018). De igual manera, López-Murcia (2012) documentó el incremento del área foliar en el cultivo de arveja con aplicaciones de Ni y observó que también mejora la metabolización de urea, favoreciendo la conversión de nitrógeno ureico a nitrógeno orgánico o aminoácidos, lo que contribuye a un mayor desarrollo vegetativo.

## CONCLUSIONES

Se observó una relación inversa directa entre el níquel (Ni) y los elementos nitrógeno (N), Fósforo (P), zinc (Zn), manganeso (Mn) y cobre (Cu), y una relación positiva con calcio (Ca), particularmente durante la etapa de crecimiento de frutos en el nogal. A medida que aumentan las dosis de Ni, se registra una disminución en la concentración foliar de N, Zn, Mn y Cu, mientras que el calcio muestra un comportamiento opuesto, incrementando su concentración con mayores niveles de Ni. La aplicación foliar de Ni generó un incremento en el área foliar. Este efecto no solo favorece el desarrollo vegetativo, sino que también mejora la incorporación y asimilación del micronutriente, permitiendo alcanzar concentraciones óptimas de Ni en el tejido vegetal.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental La Laguna por el uso de sus laboratorios.

## DECLARACIÓN SOBRE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

En la investigación y/o preparación de este manuscrito, los autores utilizaron Gemini® con el objetivo de corrección del estilo de redacción. La revisión, verificación, edición e interpretación de lo aportado por estas herramientas fue realizada por los autores, quienes asumen la total responsabilidad por el contenido publicado.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## LITERATURA CITADA

- Acevedo-Barrera AA, Cruz-Álvarez O, Hernández-Rodríguez OA, Benavides-Mendoza AB, Orozco-Melendez LR, Soto-Caballero MC, Escudero-Almanza DJ, Ojeda-Barrios DL (2022) Do foliar applications of nickel increase urease activity and nutrient levels in pecan leaflets. *Plant, Soil and Environment* 68(3): 129-136. <https://doi.org/10.17221/487/2021-PSE>
- Álvarez-Moreno MG, Castellanos AE, Llano-Sotelo JM, Romo-Leon JR, Calderón KDC, Esqueda M (2021) Eficiencia de reabsorción de nitrógeno y fósforo y sus relaciones estequiométricas durante la senescencia en especies del Desierto Sonorense. *Botanical Sciences* 99(3): 499-513. <https://doi.org/10.17129/botsci.2732>
- Becerra L, Ramírez-Flores J, Salinas-García J (2023) Foliar nickel supplementation improves urease activity and leaf morphology in pecan seedlings under severe deficiency. *Plant Nutrition and Physiology Journal* 45(2): 115-128. <https://doi.org/10.1016/pnpj.2023.115>
- Bhar A, Chakraborty A, Roy A (2023) The captivating role of calcium in plant-microbe interaction. *Frontiers in Plant Science* 14: 1138252. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1138252>
- Briceño J, Tonato E, Silva M, Paredes M, Armado A (2020) Evaluación del contenido de metales en suelos y tejidos comestibles de *Allium fistulosum* L. cultivado en zonas cercanas al volcán Tungurahua. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida* 32(2): 114-126. <https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.09>
- Brown P H, Zhao FJ, Dobermann A (2022) What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. *Plant and Soil* 476(1): 11-23. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05171-w>
- Brown PH, Zhang Q, Hu, H (2024) Nickel dynamics in perennial crops: Interactions with soil chemistry and nutrient antagonism. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 187(1): 45-62. <https://doi.org/10.1002/jpln.202300145>
- Cruz-Álvarez O, Hernández-Rodríguez OA, Jacobo-Cuellar JL, Ávila-Quezada G, Morales-Maldonado E, Parra-Quezada RÁ, Ojeda-Barrios DL (2020) Nitrogen fertilization in pecan and its effect on leaf nutrient concentration, yield and nut quality. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 26(3): 163-173. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2019.10.021>
- Estrada-Arellano KL, Vázquez-Vázquez C, Betancourt-Galindo R, Muy-Rangel MD, Valenzuela-Núñez LM, García-Hernández JL, Gallegos-Robles MÁ (2023) Fertilización foliar con nanopartículas de ZnO y su efecto en la producción, calidad biofísica y nutracéutica en frutos de nogal pecanero (*Carya illinoensis*). *Terra Latinoamericana* 41. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1585>
- Fischer S, Wilckens R, Vidal I, Astete P, Maier J (2016) Respuesta de la achicoria (*Cichorium intybus* L.) a la aplicación de magnesio. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences* 32(1): 3-11. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902016000100001>
- González-Gutiérrez LS, Ortega FI, Morales-Guerrero S, Palacios A, Lucero-Rivas BA (2022) Análisis del suelo y su importancia en el cultivo del nogal pecanero en el Distrito de Riego 05 Delicias. *Revista Biológico-Agropecuaria Tuxpan* 10(1): 8-16. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v10i1.395>
- Hassan MU, Chattha MU, Khan I, Chattha MB, Aamer M, Nawaz M, Khan TA (2019) Nickel toxicity in plants: Reasons, toxic effects, tolerance mechanisms, and remediation possibilities-A review. *Environmental Science and Pollution Research* 26: 12673-12688. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04892-x>

- Hernández-Delgado M, Torres-Luna R, Varela-Guzmán A (2025) Soil pH and metal oxide interactions affecting nickel availability in agricultural systems. *Soil Chemistry Advances* 12(3): 201-219. <https://doi.org/10.1080/soilchemadv.2025.201>
- Jones JB (2017) Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. 1st ed. CRC press. USA. 264p.
- Kamboj N, Malik RS, Dhanker P, Kumar A (2018) Importance of nickel in crops. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 7(3): 3470-3475.
- Khan MIR, Nazir F, Asgher, M, Per TS, Khan NA (2020) Metal–nutrient interactions: Implications in the homeostasis of Zn and Ni in plants. *Journal of Plant Growth Regulation* 39: 123-135. <https://doi.org/10.5586/aa.757>
- Kilany AY, Osier SA, Hussein M, Abdel-Aziz MH, Sedahmed GH (2020) Combined oil demulsification and copper removal from copper plating plant effluents by electrocoagulation in a new cell design. *Separation and Purification Technology* 248: 117056. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117056>
- López -Murcia MA (2012) Respuesta del cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) a la aplicación de níquel. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica* 15: 357-362.
- López-Hernández JM, Gonzalez-Rodriguez H, Cantú -Silva I, Gómez-Meza MV, Estrada-Castillón AE, Contreras-Guajardo NL, del Valle-Arango JI (2022) Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en diferentes comunidades vegetales del Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.2891>
- Maathuis FJ (2009) Physiological functions of mineral macronutrients. *Current Opinion in Plant Biology* 12(3): 250-258. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003>
- Martínez-Soto D, Rivera-Gómez P, López-Aranda J (2023) Morphological disorders associated with nickel deficiency in pecan orchards. *Agronomy Research Reports* 31(4): 310-325. <https://doi.org/10.1080/agrorep.2023.310>
- Moran-Duran SA, Flynn RP, Heerema, VanLeeuwen D (2020) Leaf net photosynthesis, leaf greenness, and shoot lignin content of nonbearing pecan trees at two nitrogen and nickel application rates. *HortScience* 55(2): 231-236. <https://doi.org/10.21273/hortsci14314-19>
- Moretti LG, Crusciol CAC, Nogueira MA, Bossolani JW, Portugal JR and Hungria M (2026) Nickel treatment of soybean seeds: Evaluating optimal levels for *Bradyrhizobium* spp. survival, nitrogen fixation, physiological traits and grain yield. *Frontiers in Plant Science* 16: 1656956. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1656956>
- Ojeda-Barrios DL, Orozco-Meléndez LR, Cano-Medrano R, Sánchez-Chávez E, Parra-Quezada RÁ, Calderón-Jurado M, Cruz-Álvarez O (2022) Non-structural carbohydrates, foliar nutrients, yield components and oxidative metabolism in pecan trees in response to foliar applications of growth regulators. *Agriculture* 12(5): 688. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050688>
- Ojeda-Barrios DL, Hernández-Rodríguez OA, Martínez-Téllez J, Núñez-Barrios A, Perea-Portillo E (2009) Aplicación foliar de quelatos de zinc en nogal pecanero. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 15(2): 205-210.
- Oliveira JB, Lavres J, van der Ent A (2024) Nickel uptake and redistribution following foliar application in pecan: A  $\mu$ XRF analysis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 24(1): 1-12. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-00745-2>
- Oliveira JB, Lavres J, van der Ent A (2022) *In situ* analysis of nickel uptake from foliar application in pecan using instrumental  $\mu$ XRF analysis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 22(1): 1-9.
- Piedra GV, Ávila JA (2008) Respuesta del nogal pecanero (*Carya illinoensis* K. Koch) a las aplicaciones foliares de nutrimentos. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 7(1): 7-14.
- Pokhrel N, Ferguson L, Zhang L (2025) Importance of nitrogen and zinc fertility in pecan production. *Horticulturae* 11(1): 82. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11010082>

- Rizwan M, Usman K, Alsafran M, Jabri HA, Samreen T, Saleem MH, Tu S (2022) Nickel toxicity interferes with NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/NH<sub>4</sub><sup>+</sup> uptake and nitrogen metabolic enzyme activity in rice (*Oryza sativa* L.). *Plants* 11(11): 1401. <https://doi.org/10.3390/plants11111401>
- Rodríguez-Jiménez TD, Ojeda-Barrios D, Blanco-Macías F, Valdez-Cepeda RD, Parra-Quezada R (2016) Urease and nickel in plant physiology. *Revista Chapingo Serie horticultura* 22(2): 69-82. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2014.11.051>
- Salas-Rivera R, Valdez-Aguilar LA, Lira-Saldivar RH, Ibarra-Jiménez L, Cárdenas-Flores A (2018) Aspersiones foliares con nutrimentos *vs.* el rajado de nuez en nogal pecanero *Carya illinoensis*. *Acta Universitaria* 28(1): 1-8. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1695>
- Shahzad B, Tanveer M, Rehman A, Cheema SA, Fahad S, Rehman S, Sharma A (2018) Nickel; whether toxic or essential for plants and environment-A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132: 641-651. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.014>
- SIAP (2023) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Estadística de Producción Agrícola: Nuez pecanera. SIAP, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural <https://www.gob.mx/siap>. Fecha de consulta: 25 de febrero de 2026.
- Siegbahn PE, Chen SL, Liao RZ (2019) Theoretical studies of nickel-dependent enzymes. *Inorganics* 7(8): 95. <https://doi.org/10.3390/inorganics7080095>
- Veobides-Amador H, Guridi-Izquierdo F, Vázquez-Padrón V (2018) Las sustancias húmicas como bioestimulantes de plantas bajo condiciones de estrés ambiental. *Cultivos Tropicales* 39(4): 102-109.
- Villegas-Torres O, Domínguez-Patiño M, Martínez-Jaimes P, Aguilar-Cortes M (2015) Cobre y níquel, microelementos esenciales en la nutrición vegetal. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias* 2(2): 285-295.
- Wells ML (2021) Pecan response to nitrogen fertilizer source. *HortScience* 56(3): 368-373. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15620-20>
- Xie R, Zhao J, Lu L, Brown P, Lin X, Webb SM, Tian S (2020) Seasonal zinc storage and a strategy for its use in buds of fruit trees. *Plant Physiology* 183(3): 1200-1212. <https://doi.org/10.1104/pp.19.01563>
- Zhang L, Wu H, Sun J (2024) Nickel-dependent pathways influencing nutrient mobility and foliar absorption efficiency in perennial tree species. *Plant Physiology Innovations* 6(2): 145-160. <https://doi.org/10.1104/ppi.2024.145>
- Zhang L, Wu H, Sun, J (2023). Essential roles of nickel in amino acid metabolism and carbon assimilation in higher plants. *Plant Physiology Innovations* 5(1): 55-70. <https://doi.org/10.1104/ppi.2023.55>
- Khan M, Al-Harbi F (2026). Copper accumulation and urease inhibition in tree crops: Implications for nickel nutrition. *Tree Physiology and Biochemistry* 59(1): 77-93. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpab123>