

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



APLICACIONES FOLIARES DE NÍQUEL EN NOGAL PECANERO PARA CORREGIR
SINTOMATOLOGÍA “OREJA DE RATÓN”

Tesis

Que presenta MÓNICA HERNÁNDEZ LÓPEZ

como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

Torreón, Coahuila

Marzo 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



APLICACIONES FOLIARES DE NÍQUEL EN NOGAL PECANERO PARA
CORREGIR SINTOMATOLOGÍA "OREJA DE RATÓN"

Tesis

Que presenta MÓNICA HERNÁNDEZ LÓPEZ

como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS


Dr. Vicente de Paul Alvarez Reyna
Director


Dr. Uriel Figueroa Viramontes
Co-Director

Torreón Coahuila

Marzo 2023

APLICACIONES FOLIARES DE NÍQUEL EN NOGAL PECANERO PARA
CORREGIR SINTOMATOLOGÍA "OREJA DE RATÓN".

Tesis

Elaborada por MÓNICA HERNÁNDEZ LÓPEZ como requisito parcial para obtener el
grado de Doctor en Ciencias Agrarias con la supervisión y aprobación del Comité de

Asesoría



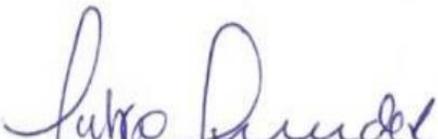
Dr. Vicente de Paul Álvarez Reyna
Director de Tesis



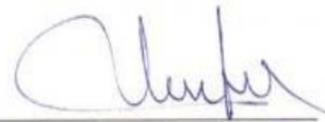
Dr. Ángel Lagarda Murrieta
Asesor



Dr. Vicente Hernández Hernández
Asesor



Dr. Pablo Preciado Rangel
Asesor



Dr. Uriel Figueroa Viramontes
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe de Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

- A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por los conocimientos brindados durante mis estudios de doctorado, por el uso de sus instalaciones.
- Al Campo Experimental La Laguna (INIFAP), por el uso de sus laboratorios e instalaciones.
- A la P.P Casa Blanca por permitirme desarrollar el proyecto en su nogalera.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de doctorado.
- A mis asesores de proyecto, los doctores: Dr. Uriel Figueroa Viramontes, Dr. Ángel Lagarda Murrieta, Dr. Vicente De Paul Alvarez Reyna, Dr. Pablo Preciado Rangel, Dr. Vicente Hernández Hernández por sus aportaciones en el proyecto y su apoyo.
- A Esther Peña Revuelta por su gran disponibilidad y servicio. Por ser una persona tan amable y eficiente en su trabajo a la cual considero amiga.

DEDICATORIAS

A mis padres y mis hermanos por su apoyo incondicional.

A mis hijos que son los que me impulsan cada día a ser mejor.

A mi esposo que siempre ha estado a mi lado apoyándome



TERRA LATINOAMERICANA

*Difusión Científica de la Sociedad Mexicana
de la Ciencia del Suelo A.C.*

Texcoco, Edo. de México a 14 de julio de 2020

Estimado Dr. Pablo Preciado-Rangel

Se notifica que la contribución:

**“Corrección de la sintomatología “oreja de ratón” en nogal pecanero
con aplicaciones foliares de níquel”**

Ha sido aceptada para su publicación en la revista Terra Latinoamericana. Así como también se le invita a pagar la publicación con un costo de \$3,000.00 pesos m/n, ya que este órgano difusor se sostiene de las contribuciones.

Por favor realice el depósito a la cuenta del banco BBVA No. **0189356592**, a nombre de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C., clabe interbancaria No. **012700001893565926**.

Envíe el comprobante de la transferencia o ficha de depósito en efectivo en una versión PDF al Tesorero de la SMCS, **M. en C. Javier Bello (javier.bello@fertilab.com.mx)**, junto con la información correspondiente para la elaboración de su factura (si así se requiere), de ser posible el mismo día de pago o bien a más tardar dos días después, en virtud de que la factura que se extiende es electrónica y debe coincidir con la fecha del depósito.

Atentamente

Dr. Bernardo Murillo Amador
Editor en Jefe
Revista Terra Latinoamericana

<http://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>
ISSN 2395-8030.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2012-092017263600-203

<LA REVISTA TERRA LATINOAMERICANA SE ENCUENTRA EN EL ÍNDICE DE REVISTAS DEL CONACYT>
Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5 Apdo. Post. 45, Chapingo. 56230 Texcoco, Estado de México, México. Tel. 59 59 52 17 21. E-mails Editor en Jefe: bmurillo04@cibnor.mx; editor@terralatinoamericana.org.mx

Revista Chapingo Serie Horticultura

Estimado(a) MC Hernández López,

La contribución titulada "Análisis de la correlación nutrimental por aplicación foliar de níquel en Nogal pecanero con sintomatología "Oreja de ratón"" ha sido recibida por la Revista Chapingo Serie Horticultura.

Se podrá seguir el proceso de evaluación de éste al ingresar a Editorial Manager en la URL: <https://www.editorialmanager.com/rchsh/> como autor (Author Login). A su escrito se le asignará un número de referencia, una vez que la revisión técnica haya sido aprobada.

Si tiene alguna duda en el manejo del Editorial Manager, enviar un correo a chapingo.horticultura@gmail.com

Saludos cordiales,

Revista Chapingo Serie Horticultura

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/rchsh/login.asp?a=r>). Please contact the publication office if you have any questions.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA | 2 |
| 2.1 Origen del nogal | 2 |
| 2.2 Importancia del Nogal en México | 2 |
| 2.3 Características del Nogal..... | 4 |
| 2.3 Etapas Fenológicas del Nogal | 5 |
| 2.3.1 Dormancia | 5 |
| 2.3.2 Brotación | 5 |
| 2.3.3 Floración..... | 6 |
| 2.3.4 Crecimiento de brote..... | 6 |
| 2.3.5 Crecimiento y desarrollo del fruto..... | 7 |
| 2.4 Factores que afectan el desarrollo del nogal..... | 8 |
| 2.5 El Níquel | 9 |
| 2.6 Importancia del Níquel..... | 10 |
| 2.7 Importancia del Ni como cofactor en la enzima ureasa | 12 |
| 2.8 El níquel en el suelo | 15 |
| 2.9 Deficiencias de Níquel | 16 |
| 2.10 Alternativas para corregir deficiencias de Ni | 17 |
| III. LITERATURA CITADA | 21 |
| IV. ARTÍCULOS | 26 |
| Corrección de la sintomatología “oreja de ratón” en nogal pecanerocon aplicaciones foliares de níquel .. | 36 |
| Análisis de la correlación nutrimental por aplicación foliar de níquel en Nogal pecanero con sintomatología “Oreja de ratón” | 44 |
| V. CONCLUSIONES GENERALES | 59 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Almendra de nuez pecanera..... | 3 |
| Figura 2.Nogal en época de dormancia..... | 4 |
| Figura 3.Nogal en época de dormancia..... | 5 |
| Figura 4. Brotación en la variedad Western | 5 |
| Figura 5. Racimo de flores femenina | 6 |
| Figura 6. Figura 6. Abundancia de amentos (flores masculinas)..... | 6 |
| Figura 7. Brotes del año en el mes de abril | 6 |
| Figura 8. Vigor de brote en nogal | 7 |
| Figura 9. Inicio del crecimiento de fruto | 7 |
| Figura 10.Endurecimiento de la cascara y apertura del ruezno | 8 |
| Figura 11. Importancia del Níquel como micro elemento | 10 |
| Figura 12.Reacción del Níquel con el agua | 11 |
| Figura 13. Hidrolisis de urea catalizada por ureasa | 12 |
| Figura 14. Mecanismo de interacción de los inhibidores con la ureasa | 13 |
| Figura 15. Figura 15. Mecanismo de acción de diferentes inhibidores (a) por ácido acetohidroxámico, (b) por molécula a base de fosfato y (c) por ácido bórico | 14 |
| Figura 16. Sintomatología “Oreja de Ratón” en hojas de nogal | 16 |
| Figura 17. Aplicaciones foliares de níquel al nogal | 17 |
| Figura 18. Aplicaciones Foliares de Níquel en soya | 19 |
| Figura 19. Eliminación de nutrientes de calcio, magnesio, potasio y nitrógeno por granos de soja, en función de la aplicación foliar de Mo y Ni | 19 |
| Figura 20. Níquel mejora la calidad de las semillas en presencia Glifosato..... | 20 |

I. INTRODUCCIÓN

México a nivel mundial es uno de los principales productores de nuez donde aporta más del 50% de la producción mundial, con una producción superior a los 554 millones de dólares. Los estados que mayormente producen son Chihuahua con 63%, Sonora con 13%, Coahuila con 10% y Durango con 5%, donde más del 60% se exporta a Estados Unidos, Europa y Asia. SIAP, 2016). El nogal requiere de 17 elementos esenciales para obtener un excelente desarrollo entre estos se encuentra el níquel (Ojeda *et al.*, 2019). El Níquel (Ni) es un elemento que pertenece a los micronutriente esencial para la asimilación de urea y metabolismo del N. El Ni es utilizado como cofactor por la enzima ureasa para la asimilación de la urea en las plantas, y en casos de privación de Ni su actividad disminuye. Además, la glutamina sintetasa también está involucrada en el metabolismo de urea y N y está influenciada por la disponibilidad de Ni (Chatzistathis, 2018). La deficiencia de Ni se puede presentar por diferentes motivos que son: El Ni presenta baja disponibilidad en el suelo cuando el pH se encuentra mayor a 7.0 y presenta una capacidad de intercambio catiónico baja, en suelos arenosos y con contenidos elevados de calcio, magnesio, cobre y zinc que inhiben la absorción de Ni (Cakmak, 2014). Una de las sintomatologías visibles de deficiencia de Ni que se han observado en el nogal, son las hojas pequeñas, conocida como “Oreja de Ratón”, Las hojas jóvenes presentan en las puntas hojas anchas, oscuras y redondeadas, mostrando similitud a las hojas de ratón (Wood *et al.*, 2004a). La deficiencia de níquel se puede tratar mediante la inclusión de bajas concentraciones de Ni en los fertilizantes líquidos, mediante aplicaciones foliares de Ni en plantas maduras (Olivera & Silva, 2021). El objetivo del presente estudio es determinar cuáles son los efectos de las aplicaciones foliares de níquel sobre la corrección de la sintomatología “Oreja de Ratón” el aumento del área foliar y el contenido de nutrientes.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen del nogal

El pecano o nogal pecanero se encontró por primera vez en 1533 por el Español López de Oviedo. Y los españoles lo denominaron “*nogal*” ya que existía un término muy semejante que utilizaban los nativos derivado del algoquin “*Pakan*” que significa “*frutos tan duros que requieren una piedra para quebrarlos*”.

Por más de 10 milenios los nogales pecaneros han sobrevivido en Norteamérica donde el gusto por las nueces también ha prevalecido por los humanos, donde en un principio los nogales eran conservados en bosques naturales para la captación de sus nueces y en la actualidad se establecen en sembradíos, junto con la búsqueda de variedades que aumenten la producción. Algunos antecedentes señalan que en el siglo XIX se obtuvieron los primeros injertos exitosos de nogal pecanero, lo cual inicio la siembra en grandes cantidades y un aumento en la producción de cultivos de mejor calidad, por otro lado, el proceso de hacer más eficiente el nogal ha sido difícil debido a los periodos largos de los ciclos juveniles y a la naturaleza heterocigota de la especie (Thompson & Conner, 2012).

2.2 Importancia del Nogal en México

La producción de nuez pecanera en los próximos 30 años ha experimentado un rápido crecimiento en México, se ha triplicado su área sembrada en la región Norte del país, correspondiente donde existe la mayor propagación natural del nogal, aumentando 3.7 veces su producción, potenciada por el aumento del consumo internacional, superando la producción de USA en los años de 2014 y 2015. Este aumento en la producción de nuez pecanera ha ubicado a México como uno de los países importantes en la exportación en el mercado internacional, generando en el año 2015 un sobrante comercial nacional mayor a los \$330 millones de dólares (SIAP, 2016).

Algunos de los estados con mayor producción de nogal en México son: Coahuila, Chihuahua, Durango, Sonora y Nuevo León, que representan 90 % de la producción nacional. En Sonora en el año 2015 se cultivan alrededor de 13 mil hectáreas (ha). La Costa de Hermosillo es el área principal productora con el 80 % de la superficie plantada. Obteniendo un rendimiento de 2.06 t/ha promedio a nivel estatal.

El fruto es el principal factor de ingresos y beneficios del nogal, (Figura 1). La nuez es un alimento altamente nutritivo que contiene 70% de lípidos, 14% de hidratos de carbono, 9% de proteínas, 3% de agua, 3% de fibras; vitaminas A, B y C, calcio, hierro, potasio, fósforo y magnesio por cada cien gramos de porción comestible y su valor energético es de unas 700 kcal (FND.2015)



Figura 1. Almendra de nuez pecanera

Las grasas insaturadas están muy presentes en el aceite de nuez pecanera y la presencia de grasas saturadas es menor si lo comparamos con las almendras y la avellanas, entre otras; y hasta el momento no se han observado ácidos grasos tipo trans. Uno de los subproductos de la extracción del aceite es la pasta, la cual presenta un abundante contenido de proteína, fibra y algunos otros elementos de importancia (Joshi, *et al.*, 2015).

2.3 Características del Nogal

El nogal pecanero, (*Carya illinoensis* Koch), puede obtener un máximo de altura de 30 m y un periodo de vida de 100 años (Madero, 2000). El nogal es de la familia Juglandaceae y es un frutal caducifolio (Chávez *et al.*, 2009). Estos árboles comienzan su edad productiva a partir de cinco a seis años (Valentini *et al.*, 2010). Esta especie es nativa de México y USA donde ambos países son grandes productores de nuez a nivel mundial (Orona *et al.*, 2007).

La producción de nuez es de más de 100 kilos por temporada (Figura 2). Las flores pistiladas (femeninas) y estaminadas (masculinas) ayudan a la formación del fruto y el viento favorece la polinización (SINAREFI.2015).



Figura 2. Nogal en época de dormancia

2.3 Etapas Fenológicas del Nogal

A continuación se muestran las etapas fenológicas del nogal pecanero.

2.3.1 Dormancia

El máximo almacenamiento de reservas se lleva a cabo en etapa de dormancia y disminuye durante la brotación de yemas, el crecimiento de brotes y hojas, (Martínez *et al.* 2013; Valenzuela *et al.* 2011). Las raíces tienden a crecer en la estación de invierno, mientras que el tronco y ramas se detiene, y en verano se presentando un efecto inverso (Valenzuela *et al.*, 2014; Valenzuela *et al.*, 2011; Valenzuela, 2006) (Figura 3).



Figura 3. Nogal en época de dormancia

2.3.2 Brotación

Cuando la yema se hincha y desprende la escama externa se considera la etapa de brotación, donde la escama interna de color amarillo limón queda expuesta (Figura 4). Días después aparece primordio foliar, de color verde claro, al separarse la escama interna (Figura 4). Cuando el tejido foliar tiene 2.5 cm de longitud promedio se hace la primera aspersion con níquel (Tarango, 2012)



Figura 4. Brotación en la variedad Western (Tarango, 2012).

2.3.3 Floración

Esta etapa se lleva a cabo entre noviembre y marzo donde la modificación genética ocurre en el interior de las yemas de los brotes. Donde coincide con el crecimiento del fruto de la estación. El desarrollo de las flores masculinas se puede observar semanas antes de la brotación al año siguiente.

En la Figura 5 se observan las flores femeninas de la variedad Western en la fase de receptibilidad de estigma (Tarango, 2012).

En la Figura 6 se muestra las flores masculinas de la variedad Wichita, en la fase de liberación de polen (Tarango, 2012).



Figura 5. Racimo de flores femenina (Tarango, 2012)



Figura 6. Abundancia de amentos (flores masculinas) (Tarango 2012)

2.3.4 Crecimiento de brote

El crecimiento del brote en nogal se muestra en el periodo de finales de marzo a mediados de junio, pero en abril y mediados de mayo se presenta la época de ‘crecimiento rápido’ (Figura 7). El 75 % del crecimiento del total del brote se presenta en los 45 días posteriores a la brotación. (Tarango, 2012).



Figura 7. Brotes del año en el mes de abril (Tarango. 2012)

Donde existe presencia de brotes vigorosos con mayor área foliar se puede producir más flores y retienen más nueces llenando mejor la almendra(Figura 8). Los brotes de 15 a 30 cm de longitud de la variedad Western con hojas grandes son suficientes para una buena cosecha, mientras que en los brotes de 25 a 45 cm de la variedad son más productivos (Tarango, 2012).



Figura 8. Vigor de brote en nogal (Tarango, 2012)

2.3.5 Crecimiento y desarrollo del fruto

El crecimiento de frutos comprende de dos fases que son:

1. La polinización y endurecimiento de la cáscara donde no hay mayor crecimiento de la nuez después de esta fase (Fasiolo, 2014).



Figura 9. Inicio del crecimiento de fruto (Fasiolo, 2014).

2. Llenado de la nuez que abarca desde el endurecimiento de la cáscara hasta la apertura del ruezno (Figura 10). La almendra crece y se llena durante esta etapa (Fasiolo, 2014).



Figura 10. Endurecimiento de la cáscara y apertura del ruezno (Fasiolo, 2014).

2.4 Factores que afectan el desarrollo del nogal

Existen varios aspectos que afectan el desarrollo del árbol como son: precipitaciones pluviales, humedad relativa, temperatura. Las temperaturas ideales para el desarrollo oscilan entre los 25 a 30 grados centígrados. Otro aspecto a considerar son que se requiere de mínimo 210 días libres de heladas. Si la humedad relativa supera el 80 % el periodo de polinización se ve afectado acortando la polinización efectiva debido a que las anteras no abren para liberar el polen y contribuyen a la proliferación de enfermedades fungosas que perjudican al follaje (Cano. 2011).

2.5 El Níquel

Antes del 2003 el Níquel no era considerado como un micronutriente esencial pero después de este año fue decretado como un “Nutriente Esencial” por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos, después de muchos estudios que demostraron su importancia en el contenido de nutrientes de origen vegetal. Las plantas están limitadas a finalizar su periodo de vida en ausencia de níquel y ningún otro elemento lo puede sustituir, por lo tanto se considera esencial, las concentraciones requeridas en las mayoría de las plantas son muy bajas de 0.5 a 10 mg kg⁻¹ de peso seco (Chen *et al.*, 2009).

En 1987 Patrick Brown realizo un estudio en la Universidad de Davis donde comprobó que el níquel es esencial para todos los cultivos y no solamente para las leguminosas como se pensaba. Las plantas absorben el níquel como Ni²⁺ y es necesario en bajas concentraciones por las plantas superiores, se utiliza para metabolizar el nitrógeno y la germinación de las semillas. Las raíces son la principal fuente de absorción de níquel en las planta se realiza por transferencia pasiva y transporte activo (Seregin y Kozhevnikova, 2006). Y existe una competencia del níquel con otros elementos presentes en el suelo principalmente con los metales. Se han realizado algunos estudios donde se observa que el níquel se puede absorber como (At1RT1) por medio de las raíces utilizando el hierro a través de un transportador que es el cual funciona como regulador en la acumulación de níquel en Arabidopsis thaliana (Nishida *et al.*, 2011).

Se conoce muy poco acerca del metabolismo o la función del Ni a pesar de los estudios realizados y las comparaciones con otros micronutrientes (Figura 11) (Contreras *et al.*, 2006). Gran parte de esto se debe a que las concentraciones requeridas por los cultivos son muy bajas (0.001 mg·kg⁻¹ de peso seco) en comparación con la existencia del Ni en los suelos que son superiores a 5 kg·ha⁻¹. Una de las sintomatologías relacionadas con la deficiencia de este elemento es la deformidad de los foliolos y es conocida como “Oreja de ratón (Wood *et al.*, 2004 a, b, c).

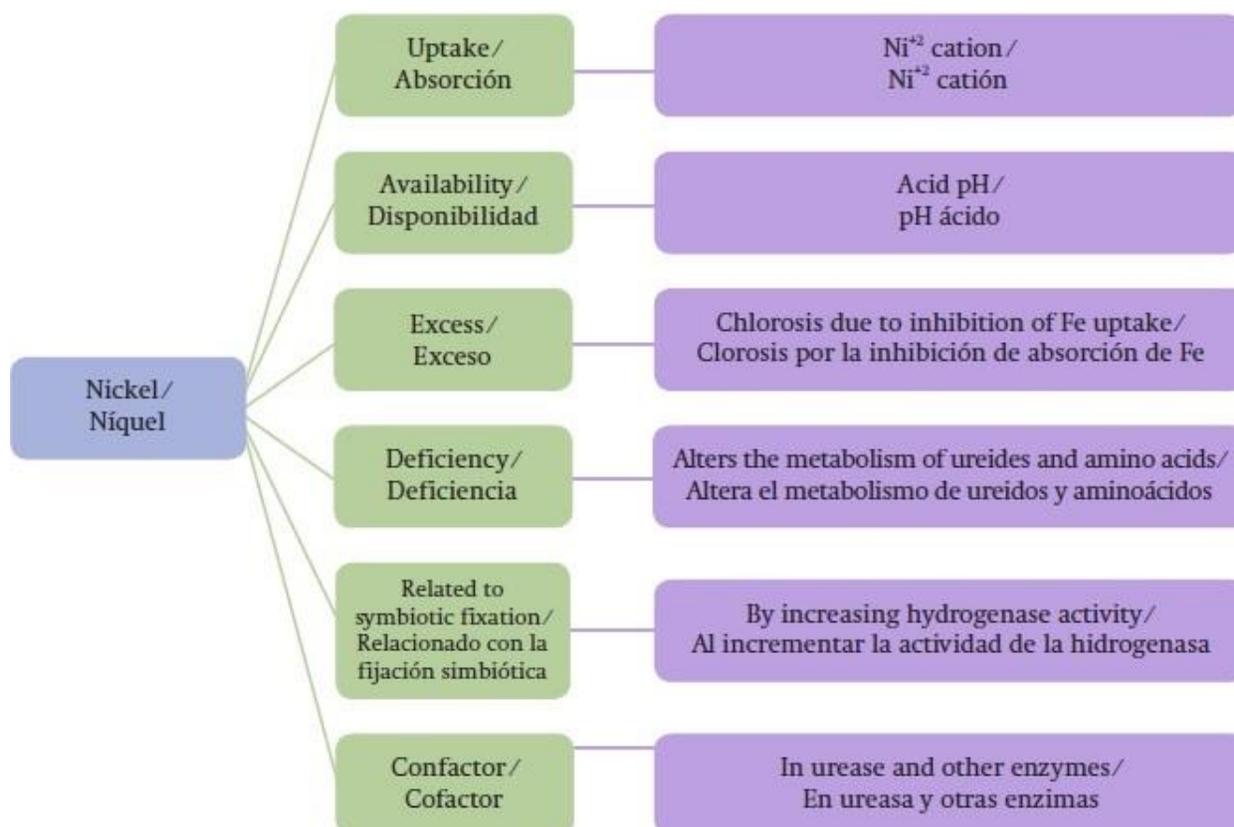


Figura 11. Importancia del Níquel como micro elemento (Wood et al., 2004a, b, c).

2.6 Importancia del Níquel

La ureasa utiliza el Ni para su asimilación de Nitrógeno por lo que una mínima concentración de níquel dificulta la acción de ureasa y esto ocasiona incrementos en las concentraciones de urea que ocasiona la aparición de manchas necróticas en las hojas, disminuye el metabolismo de los aminoácidos, provoca un aumento en la producción ácido oxálico y láctico en las hojas, disminuyen los ureidos y ácidos orgánicos. Es muy importante la enzima ureasa en la nutrición vegetal, ya que esta enzima hidroliza la urea para obtener amoníaco, cuando se utiliza fertilizante a base de urea como su principal aporte de nitrógeno (Cakmak, 2014).

En la Figura 12 se muestra la hidrolisis de la urea que pasa a ácido carbónico; donde la enzima ocasiona que este proceso sea 10^{14} veces más rápido, obteniendo ácido carbónico y amoníaco,

generando una reacción instantánea a otra molécula de amoníaco y ácido carbónico (Zambelli *et al.*, 2014).

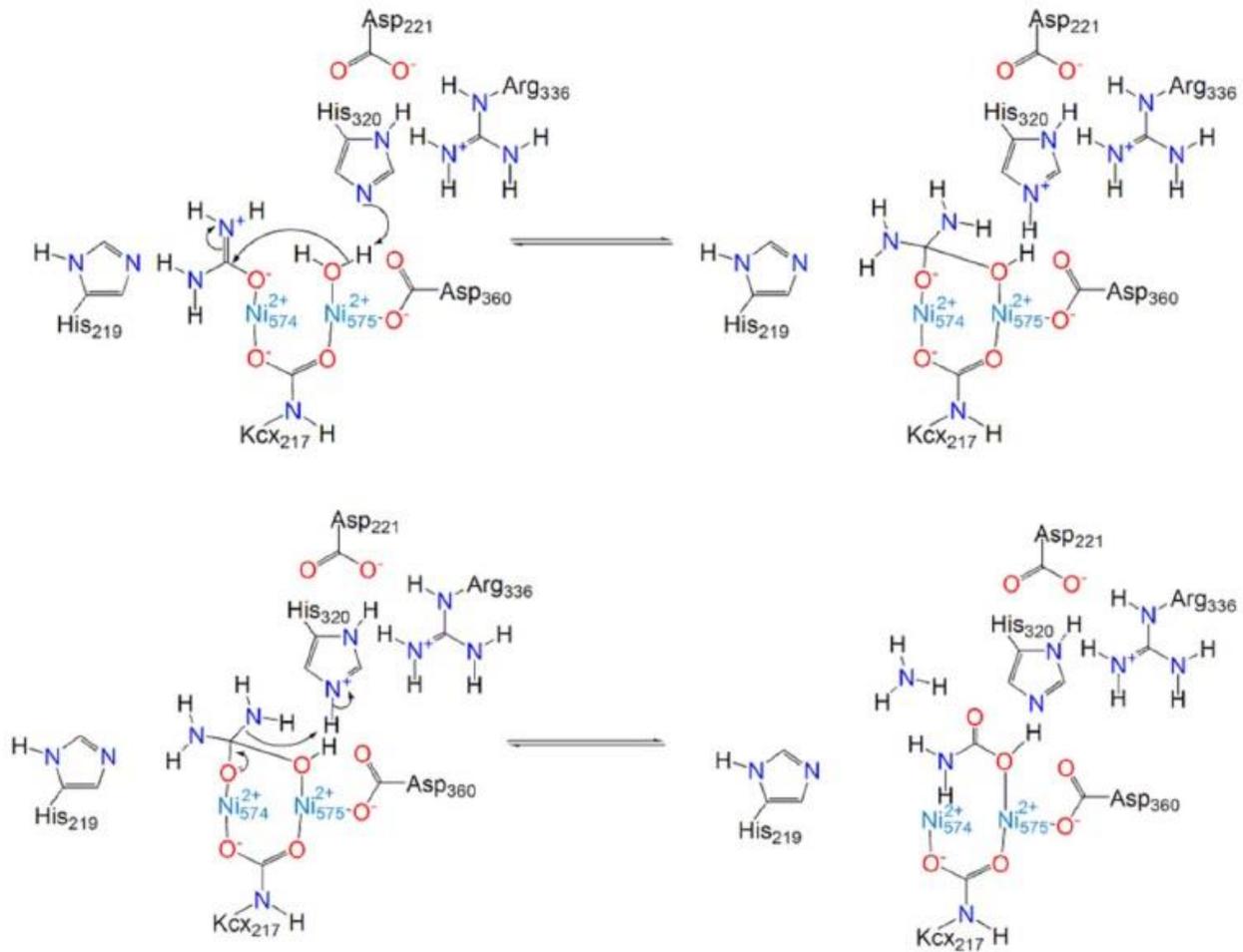


Figura 12. Reacción del Níquel con el agua (Zambelli *et al.*, 2014).

En la Figura 13 se puede observar cómo se obtiene el amoníaco y ácido carbónico resultado de una reacción de hidrólisis de la enzima ureasa y la intervención de dos átomos de níquel. Para llevar a cabo la metabolización de nitrógeno la presencia de la enzima es muy importante y en ausencia de esta o la baja concentración de níquel disminuyen dicha concentración. (Wood, Reilly, & Nyczepir, 2004b).

2.7 Importancia del Ni como cofactor en la enzima ureasa

Para la salud de los seres vivos el metabolismo del nitrógeno es fundamental. Los desechos residuales de nitrógeno por el catabolismo de los aminoácidos son excretados como urea por el riñón. En los mamíferos esta molécula de desecho es importante para el metabolismo en plantas, bacterias y hongos, ya que estos hidrolizan la urea en amonio para conseguir trazas de nitrógeno esencial para su desarrollo, En estas formas de vida la ureasa ureasa dependiente de níquel permite hidrolizar la urea y formar amonio (Valenzuela *et al.*, 2021).

La urea es el sustrato natural de la enzima ureasa (urea amidohidrolasasa), la cual es una metaloenzima ubicua (Kappaun *et al.*, 2018). La ureasas e presenta como una enzima clave para el ciclo global de nitrógeno que se encuentra presente en las plantas, hongos y bacterias (Cantarella *et al.*, 2018), más no en animales. Este tipo de enzimas acelera 10^{14} veces la tasa de hidrolisis de la urea a amoniaco (NH_3), o amonio (NH_4), y a dióxido de carbón (CO_2) (Maroney & Ciurli., 2014), en comparación con la descomposición de urea por reacción de eliminación (Kappaun *et al.*, 2018).

Las urea amidohidrolasas, una clase de enzimas extendida entre todos los tipos de organismos que van desde organismos unicelulares hasta organismos multicelulares superiores (Figura 13), generalmente se denominan ureasas. Participan activamente en la formación de carbamato y amoniaco a partir de la hidrólisis de la urea. El carbamato se divide aún más para producir otra molécula de amoniaco. La reacción general catalizada por la ureasa se muestra en la Figura 13 (Hseu & Lai., 2017).

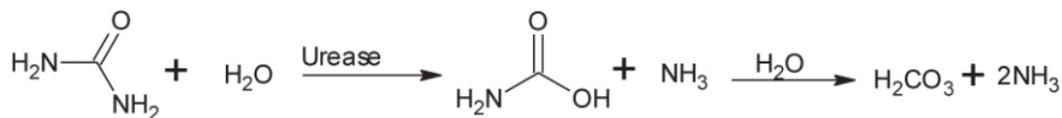


Figura 13. Hidrolisis de urea catalizada por ureasa (Hseu & Lai., 2017).

Desde su descubrimiento en plantas (Nasu & Campbell., 2018), la cristalización de la enzima ureasa aislada de semillas de frijol rojo (*Canavalia ensiformis*) por James B. Sumner en 1926, demostró la naturaleza proteica de las enzimas (Kappaun *et al.*, 2018), la cual fue investigada exhaustivamente y se convirtió en un hito en las ciencias bioquímicas como la

primera enzima en ser cristalizada (Cantarella *et al.*, 2018). Además, se demostró que su actividad catalítica es estrictamente dependiente de iones de níquel (N^{2+}), y dicha dependencia es una característica única de la ureasa entre las enzimas hidrolíticas (Tao *et al.*, 2018). La importancia de este elemento metálico para la función de ureasas fue establecida en 1975, después de los estudios del grupo Zerner que revelaron la existencia de iones de níquel en el sitio activo de la ureasa del frijol rojo (JbU, de sus siglas en inglés: Jack bean ureasa) como componente obligatorio para la actividad catalítica de esta enzima (Kappaun *et al.*, 2018). Los ureidos son catabolizada por la enzima alantoides amidohidrolasa a producir amoníaco, o la alantoína puede someterse a hidrólisis para la producción de urea, que a su vez requiere ureasa para la liberación de amoníaco y su posterior asimilación en aminoácidos (Buchanan *et al.*, 2015).

Estructuralmente, la enzima se compone de dos centros de níquel (II), cada uno coordinado por dos nitrógenos de histidinas, una molécula de agua y un puente de lisina carbamilada a través del átomo de O (Figura 14). El Ni (2) está además coordinado por el átomo de O del ácido aspártico. Por lo tanto, una de las monedas de cinco centavos está penta-coordinada mientras que la otra está hexa-coordinada con geometría piramidal pseudocuadrada para la primera y geometría pseudooctaédrica para la segunda respectivamente. La inhibición de la enzima se logra mediante varios métodos. Uno de estos incluye el desplazamiento de la molécula de agua por el inhibidor que interactúa (Zambelli *et al.*, 2014).

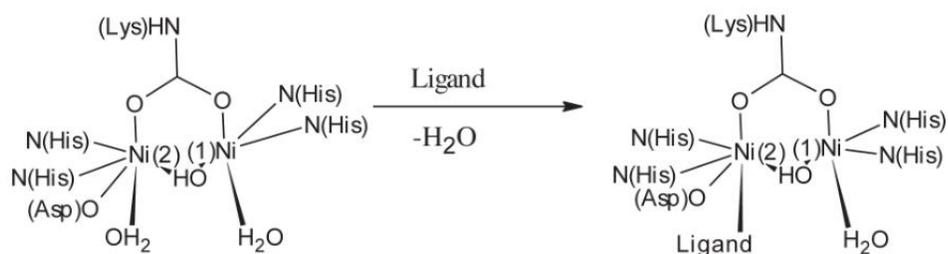


Figura 14. Mecanismo de interacción de los inhibidores con la ureasa (Lebrette *et al.*, 2014).

En la Figura 15 se pueden ver el mecanismo de inhibición de la ureasa para el ácido acetohidroxámico, los compuestos a base de fosfato y el ácido bórico.

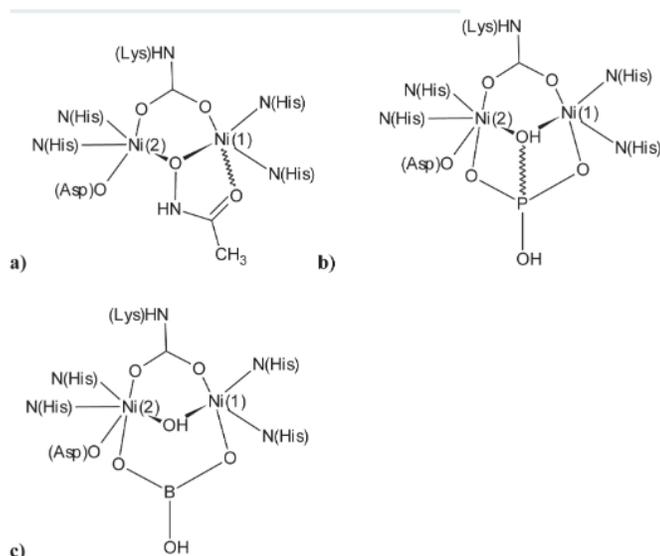


Figura 15. Figura 15. Mecanismo de acción de diferentes inhibidores (a) por ácido acetohidroxámico, (b) por molécula a base de fosfato y (c) por ácido bórico (Lebrette et al., 2014).

La presencia de níquel en algunas leguminosas, es necesarias para el desarrollo de nódulos en raíces y activación de hidrogenasa. Para llevar a cabo la fijación de nitrógeno es muy importante la presencia de la hidrogenasa para oxidar el hidrógeno que brinda ATP para la reducción de N_2 a NH_3 . Se ha comprobado que las concentraciones bajas de Ni pueden promover la germinación de semillas en algunas plantas. (Seregin & Kozhevnikova, 2006).

2.8 El níquel en el suelo

En el suelo el contenido de níquel presente depende del material que le dio origen. Mientras que el contenido del níquel en la superficie en ocasiones debe a la contaminación del suelo. En el mundo se encuentran valores de níquel que van desde 0.2 hasta 450 mg kg⁻¹ (Ugarte *et al.*, 2015).

El número atómico del Níquel (Ni) es 28 y su principal estado de oxidación es +2. El Ni se encuentra en grupo del (Fe), que incluye al (Co), ambos pueden combinarse fácilmente con el hierro metálico.

Existe una abundancia en la corteza terrestre de Ni alrededor 20 mg kg⁻¹, y en las rocas ultra básicas (ultramáficas), varía entre 1400 y 2000 mg kg⁻¹, disminuyendo con el incremento de la acidez de la roca. Las rocas sedimentarias contienen el Ni en el rango mayor 5 y menor 90 mg kg⁻¹, con valores superiores en materiales arcillosos; en el granito se encuentra entre 5 y 20 mg kg⁻¹. (Kabata & Murkherjee, 2015).

Existen diferentes formas del Ni en el suelo que son las móviles, inmóviles y reactivas (Alloway, 2013). El origen y las características del suelo son algunos factores que determinan las concentraciones de Ni en las plantas, el pH, materia orgánica y contenido de arcilla controlan la disponibilidad del Ni y su comportamiento (Babativa & Caicedo, 2018).

Algunas concentraciones encontradas en cereales varían entre 0.34 y 14.6 mg kg⁻¹, y dependiendo del cultivo generalmente no superan 1.28 mg kg⁻¹ (Neira *et al.*, 2021).

2.9 Deficiencias de Níquel

La sintomatología conocida como “Oreja de ratón” se presenta con deficiencia de Ni bajo condiciones de campo que puede ocasionar grandes problemas en cultivos altamente sensibles al Ni. (Ver Figura 16).

Le enzima ureasa utiliza el níquel como parte del metabolismo del nitrógeno en el árbol (Figuroa *et al.*, 2006). Según este autor, los árboles que son replantados en sitios donde había nogales maduros presentan deficiencias de Ni y esto se debe probablemente a una acumulación excesiva de Zn. En suelos arenosos y con pH tendiente a la acidez también se puede presentar este problema.



Figura 16. Sintomatología “Oreja de Ratón” en hojas de nogal

Se han considerado que es necesario tener concentraciones de 5 a 15 ppm en folíolos. En cultivos de hidroponía que se basan en urea se ha encontrado que la baja concentraciones de Ni ocasionan un aumento en concentraciones de urea, y esto se debe a que se acumula en las hojas ocasionando toxicidad.

En la semilla de cebada se ha determinado que el Ni es requerido en cantidades de 240 nanogramos en materia seca y se obtuvo una germinación de 95% mientras que a cantidades de 40 nanogramos en materia seca la germinación fue apenas de 30%. El rendimiento en semillas en peso baja hasta un 50% cuando se presentan bajas concentraciones del micronutriente, afectando el aumento foliar de los cultivos (Kutman *et al.*, 2013).

En un cultivo de soya se mostró que cuando la fuente de fertilización nitrogenada es urea la deficiencia de Ni se agrava, esto se debe a que la ausencia de Ni limita el metabolismo de la urea y este se deposita en las hojas generando trastornos y daños a las plantas.

En un estudio con diferentes plantas se determinó que el Ni y la ureasa son esenciales para el desarrollo y los procesos vitales, y que una baja concentración níquel y mínima actividad de la ureasa ocasionan un bajo metabolismo del nitrógeno y una acumulación de urea a niveles tóxicos en los brotes ocasionando varios síntomas como necrosis en las puntas, mayormente en hojas jóvenes o clorosis en hojas viejas (Yusuf *et al.*, 2011).

2.10 Alternativas para corregir deficiencias de Ni

El níquel puede aumentar el rendimiento si se aplica de manera foliar debido al efecto de Ni en la reducción de los síntomas de infección por hongos (Langenbach *et al.*, 2016; Godoy *et al.*, 2016; Reis *et al.*, 2014;).

La deficiencia de níquel se puede tratar mediante la inclusión de bajas concentraciones de Ni en los fertilizantes líquidos (Brown *et al.*, 1987; Eskew *et al.*, 1983), mediante aplicaciones foliares de Ni en plantas maduras (Oliveira *et al.*, 2021) (Figura 17), o aplicando tratamientos de Ni a semillas (Lavres *et al.*, 2016).



Figura 17. Aplicaciones foliares de níquel al nogal

Comprender el proceso de absorción del Ni aplicado a través del tratamiento de la semilla es el primer paso para determinar estrategias efectivas destinadas a lograr una mejor gestión (Freitas et al., 2020). En este sentido, el uso de rayos X con procedimientos de fluorescencia (XRF) es un método no destructivo efectivo para la evaluación cuantitativa de la distribución elemental en especímenes de plantas (Savassa *et al.*, 2021). Este enfoque permite determinar la concentración, distribución y entorno químico de los elementos en ensayos en tiempo real en tejidos hidratados a temperatura ambiente (Montanha *et al.*, 2020).

Al inicio este síntoma se atribuyó a enfermedades virales, daños por frío o deficiencias de manganeso o cobre, pero los estudios foliares de hojas sanas y afectadas, mostraron que los síntomas son provocados por deficiencia de Ni o inducidos por exceso de Zn en el suelo (Wood *et al.*, 2004b).

En un estudio donde se aplicaron dosis de níquel y molibdeno al cultivo de soja de manera separada y en conjunto se observó un aumento lineal en el número de vainas por planta (NGP) con tasas de hasta 60 g ha⁻¹ de Ni (López *et al.*, 2016), pero no se encontró ningún efecto sobre el número de granos por vaina (NPP). Para NGP y masa de mil granos (MTG), no se observaron efectos de los tratamientos (Heidarzade. 2016). El rendimiento del cultivo obtenido en el experimento fue superior a la media del municipio de Campo Mourão en el año agrícola 17/18 (3492 kg ha⁻¹) (SEAB, 2018), debido a las buenas condiciones climáticas durante la realización del estudio (Figura 18) y también porque el manejo fitosanitario fue adecuado.

El rendimiento fue un 9% mayor cuando solo se aplicó Ni con respecto al control, y el tratamiento con Mo fue 12% mayor cuando los dos micronutrientes fueron combinados (Figura 18).

| Treatments | NPP | NGP | MTG | CY |
|-----------------|----------------------|--------|---------|---------------------|
| | | | g | kg ha ⁻¹ |
| Control | 96.75 b [†] | 2.40 a | 153.2 a | 4625 c |
| Molybdenum (Mo) | 98.35 b | 2.42 a | 160.9 a | 4660 c |
| Nickel (Ni) | 106.37 a | 2.38 a | 157.1 a | 5055 b |
| Mo + Ni | 112.68 a | 2.34 a | 163.4 a | 5270 a |
| LSD | 3.6 | 0.12 | 11.44 | 163.03 |
| VC | 6 | 2.4 | 10.3 | 8.2 |

Figura 18. Aplicaciones Foliar de Níquel en soja (Heidarzade. 2016).

Número de vainas por planta (NPP), número de granos por vaina (NGP), masa de mil granos (MTG) y cosecha rendimiento (CY) de soja, en función de la aplicación de aspersión foliar de Mo y Ni

Los datos sobre la eliminación de calcio, magnesio, potasio y nitrógeno se presentan en la Figura 19. Se muestra que solo el nitrógeno fue influenciado por los tratamientos, donde la aplicación de níquel solo incrementó la exportación en un 7%, y la asociación de molibdeno y níquel lo hizo en un 14%, con relación a los otros dos tratamientos (Lucasynski, 2019). Resultados que indican que las dosis de níquel aumenta la actividad de la ureasa, lo que provoca que la planta asimile y exporte más nitrógeno (Kutman, 2013).

| Treatments | Ca | Mg | K | N |
|-----------------|---------------------------------|---------|---------|----------|
| | ----- kg ha ⁻¹ ----- | | | |
| Control | 13.40 a [†] | 11.68 a | 44.74 a | 210.36 c |
| Molybdenum (Mo) | 13.80 a | 11.69 a | 45.88 a | 220.18 c |
| Nickel (Ni) | 14.88 a | 12.61 a | 59.12 a | 230.96 b |
| Mo + Ni | 13.97 a | 13.10 a | 52.59 a | 250.82 a |
| LSD | 5.38 | 4.01 | 19.85 | 10.09 |
| VC | 17.39 | 14.83 | 17.78 | 3.0 |

[†] Means followed by the same letter in a column do not differ (Tukey, $P \leq 0.05$).

[†] As médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem pelo teste de Tukey em $P \leq 0.05$.

Figura 19. Eliminación de nutrientes de calcio, magnesio, potasio y nitrógeno por granos de soja, en función de la aplicación foliar de Mo y Ni (Kutman., 2013).

Uno de los herbicidas más utilizados en el mundo para controlar maleza en cultivos es el denominado Glifosato (Figura 20). Dicho herbicida ha ocasionado una disminución en rendimiento de hasta el 70%, así como de ocasionar daños como: la propagación vegetativa de la especie en exceso, achaparramiento, y descontrol hormonal. El Glifosato tiene una gran afinidad con el Ni, por lo que se hace una sugerencia de que el níquel pudiera disminuir los daños del herbicida. Kutman en 2014 realizó un estudio en trigo donde se determinó que el Ni contribuye a evitar que el glifosato afecte al cultivo, donde se pudo comprobar que en las semillas donde solo se aplicó glifosato tenían una mala calidad y baja viabilidad de germinación, mientras que donde se aplicó níquel con glifosato la calidad de la semilla mejoro. (Figura 20).



Figura 20. Níquel mejora la calidad de las semillas en presencia Glifosato, (Kutman., 2014).

III. LITERATURA CITADA

- Alloway, B. J. (2013). Environmental pollution. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability, 22,613p.
- Babativa Pulido, I. A., & Caicedo Molina, J. C. (2018). Evaluación de la presencia y distribución de los metales pesados cromo, níquel y plomo en el río Ocoa, en la zona comprendida entre la desembocadura del caño Maizaro hasta el puente Murujuy, municipio de Villavicencio-Meta.
- Brown, P. H., Welch, R. M., & Cary, E. E. (1987). Nickel: A micronutrient essential for higher plants. *Plant physiology*, 85(3), 801-803.
- Buchanan, B. B., W. Gruissem, and R. L. Jones. (2015). *Biochemistry and molecular biology of plants*. John Wiley and Sons.
- Cakmak, I. (2014). El Níquel en el Crecimiento Vegetal. Congreso Internacional de Nutrición y Fisiología Vegetal INTAGRI. Guadalajara, Jalisco, México.
- Cano J. (2011). "Manejo orgánico del nogal pecanero" *Cultura orgánica*. 15: 17-26
Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero. 2015. Panorama de la nuez. (Actualizado julio 2014, Citado 15 Feb 2015) Disponible en: www.financiararural.gob.mx
- Cantarella, H., Otto, R., Soares, J. R., & de Brito Silva, A. G (2018). Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. *Journal of advanced research*, 13, 19-27.
- Chatzistathis, Theocharis (2018). Physiological Importance of Manganese, Cobalt and Nickel and the Improvement of Their Uptake and Utilization by Plants. *Plant Micronutrient Use Efficiency*, 123-135.
- Chávez, E. J. J.; González, L.; Valenzuela, N.; Potisek, T. Ma. C. y González, C. G. 2009. Morfología, índice y densidad estomática en plántulas de nogal pecanero cultivadas bajo tres niveles de radiación solar. *Agrofaz*. 9(3):85-90.
- Chen, C., Huang, D., Liu, J. (2009). Functions and Toxicity of Nickel in Plants: Recent Advances and Future Prospects *Clean* 2009, 37 (4–5), 304 – 313
- Contreras, R., Fontal-Rivera, B., Reyes-Malavé, M., Suárez, T., Bellandini, F., Romero, I., & Cancines, P. (2006). *Algo más sobre alimentos: una visión desde la química*. México: Universidad de los Andes.
- Eskew, D. L., Welch, R. M., & Cary, E. E. (1983). Nickel: an essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. *Science*, 222(4624), 621-623.
- Fasiolo C. (2014): Variedades de Pecán. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)- Estación Experimental Las Brujas, Uruguay. Obtenido de: <http://www.inia.org.uy>.

- Figueroa V U, Lombardini L y Medina M C. (2006). Alternativas en la fertilización del nogal pecanero. XIV Simposium Internacional Nogalero. Torreón Coahuila. México.
- Financiera Nacional de Desarrollo Agropecuario, Rural, Forestal y Pesquero (FND) (2015). Panorama de la nuez. (Actualizado julio 2014, Citado 22 Feb 2015) Disponible en: www.financierarural.gob.mx
- Freitas-Silva, L., de Araújo, T. O., Nunes-Nesi, A., Ribeiro, C., Costa, A. C., & da Silva, L. C. (2020). Evaluation of morphological and metabolic responses to glyphosate exposure in two neotropical plant species. *Ecological Indicators*, 113, 106246.
- Godoy CV, Seixas CDS, Soares RM, Marcelino-Guimarães FC, Meyer MC, Costamilan LM. (2016). Asian soybean rust in Brazil: past, present, and future. *Pesq Agrop Bras*. 51: 407- 421.
- Heidarzade, A., M. Esmaeili, M. Bahmanyar, and R. Abbasi (2016). Response of soybean (*Glycine max*) to molybdenum and iron spray under well-watered and water deficit conditions. *J. Exp. Biol. Agric. Sci* , 4: 38-46.
- Hseu, Z. Y., & Lai, Y. J. (2017). Nickel accumulation in paddy rice on serpentine soils containing high geogenic nickel contents in Taiwan. *Environmental geochemistry and health*, 39, 1325-1334.
- Joshi, A. U., Liu, C. Q., & Sathe, S. K. (2015). Functional properties of select seed flours. *LWT Food Science and Technology*, 60(1), 325–331. [https://doi.org/DOI 10.1016/j.lwt.2014.08.038](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.08.038)
- Kabata-Pendias, A. y Mukherjee, A. B. (2007). Trace Elements from Soil to Human [en línea]. edit. Springer Berlin Heidelberg, 519 p., ISBN 978-3-540-32713-4, DOI <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-32714-1>, [Consultado: 28 de noviembre de 2015]
- Kappaun, K., Piovesan, A. R., Carlini, C. R., & Ligabue-Braun, R. (2018). Ureases: Historical aspects, catalytic, and non-catalytic properties—A review. *Journal of advanced research*, 13, 3-17.
- Kutman*, B.Y., Kutman*, U.B. and Cakmak, I. (2013) Foliar nickel application alleviates detrimental effects of glyphosate on grain yield and seed quality of wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 61: 8364-8372
- Kutman*, B.Y., Kutman*, U.B. and Cakmak, I (2014). Effects of seed nickel reserves or externally supplied nickel on the growth, nitrogen metabolites and nitrogen use efficiency of urea- or nitrate-fed soybean. *Plant and Soil* , 376:261-276.
- Langenbach C, Campe R, Beyer S, Mueller AN, Conrath U (2016). Fighting asian soybean rust. *Front Plant Sci*. 7: 797.

- Lavres, J., Castro Franco, G., & de Sousa Câmara, G. M. (2016). Soybean seed treatment with nickel improves biological nitrogen fixation and urease activity. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 37.
- Lebrette, H., Brochier-Armanet, C., Zambelli, B., Reuse, H., Borezié-Durant, E., Ciurli, S., & Cavazza, C. (2014). Promiscuous nickel import in human pathogens: structure, thermodynamics, and evolution of extracytoplasmic nickel-binding proteins. *Structure*, 22(10), 1421-1432. doi: 10.1016/j.str.2014.07.012.
- Lopez, J. F., F. C. Coelho, W. S. Rabello, O. J. P. Rangel, G. de A. Gravina e H. D. Vieira. (2016). Produtividade e composição mineral do feijão em resposta às adubações com molibdênio e níquel. *Rev. Ceres*, 63: 419-426.
- Lucasynski Carlim, E., Meert, L., Reis, B., & Ercoli Alleman, L (2019). Fertilization with nickel and molybdenum in soybean: effect on agronomic characteristics and grain quality. *Terra Latinoamericana*, 37, 217-222.
- Madero, E. (2000). La nuez de pecán. Programa de estudios fenológicos - proyecto PROPECÁN-INTA Delta . *Idia XXI*. 78-82 p
- Montanha, G. S., Rodrigues, E. S., Marques, J. P. R., de Almeida, E., Colzato, M., & Pereira de Carvalho, H. W. (2020). Zinc nanocoated seeds: an alternative to boost soybean seed germination and seedling development. *SN Applied Sciences*, 2(5), 1-11.
- Maroney, M. J., & Ciurli, S. (2014). Nonredox nickel enzymes. *Chemical reviews*, 114(8), 4206-4228.
- Martínez, T.; Plascencia, F. e Islas, L. (2013). La relación entre los carbohidratos y la vitalidad en árboles urbanos. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Rev. Chapingo Ser. Cienc. For. Amb.* 19(3):459-468
- Nasu, Y., & Campbell, R. E. (2018). Unnaturally aglow with a bright inner light. *Science*, 359(6378), 868-869.
- Neira-Moscoso, C., Rojas-Sánchez, J. M., & Rodas-Espinoza, C. METALES PESADOS. *COLOQUIO*, 2021, (66), 72-77.
- Nishida, S., Tsuzuki, C., Kato, A., Aisu, A., Yoshida, J., & Mizuno, T. (2011). AtIRT1, the primary iron uptake transporter in the root, mediates excess nickel accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant and Cell Physiology*, 52(8), 1433-1442.
- Ojeda Barrios, D. L., Fernández Fernández, V., Sánchez Chávez, E., & Ramirez Rodriguez, H. (2019). Manejo de la nutrición y fertilización en el cultivo del nogal pecanero.

- Oliveira, G. A., & da Silva, L. R. M. (2021). Sistemas mecanizados de níquel-titânio empregados no preparo do canal radicular: uma revisão de literatura. *Research, Society and Development*, 10(15), e128101522474-e128101522474.
- Orona, I. ; Espinoza, J.; González, G. ; Murillo, B.; García, J. y Santamaría, J. (2007). Aspectos técnicos y socioeconómicos de la producción de nuez (*Carya illinoensis*) en la Comarca Lagunera. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Rev. Mex. Agron. Sociedad Mexicana de Administración Agropecuaria AC. México. 11(20):299-307.
- Reis AR, Rodak BW, Putti FF, Moraes MF (2014). Papel fisiológico do níquel: essencialidade e toxidez em plantas. *Inform Agron*, 147: 10-24.
- SEAB (Secretaria da Agricultura e Abastecimento) (2018). Secretaria de estado da agricultura e do abastecimento do Paraná. Comparativo de área, produção e rendimento para a cultura: Soja (1ª Safra) – Safras 17/18 – 18/19.
- SIAP (Servicio de Informacion Agroalimentaria y Pesquera). (2016). Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Atlas Agroalimentario 2016. Recuperado el día 19 de marzo del 2022 de https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016.
- Savassa, S. M., Castillo-Michel, H., del Real, A. E. P., Reyes-Herrera, J., Marques, J. P. R., & de Carvalho, H. W. (2021). Ag nanoparticles enhancing *Phaseolus vulgaris* seedling development: understanding nanoparticle migration and chemical transformation across the seed coat. *Environmental Science: Nano*, 8(2), 493-501.
- Seregin, I. V. and Kozhevnikova, A. D. (2006). Physiological Role of Nickel and Its Toxic Effects on Higher Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2006, Vol. 53, No. 2, pp. 257–27
- (SINAREFI) Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos para la Alimentación y la Agricultura México. (2015). (citado 10 Septiembre 2022). Disponible en: <http://www.sinarefi.org.mx>.
- Tarango- Rinero S.H. (2012). Manejo del nogal Pecanero en base a su Fenología. Folleto Técnico No. 24. México. CEDEL- INIFAP. 7p.
- Tao, R., Li, J., Guan, Y., Liang, Y., Hu, B., Lv, J., & Chu, G. (2018). Effects of urease and nitrification inhibitors on the soil mineral nitrogen dynamics and nitrous oxide (N₂O) emissions on calcareous soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 9155-9164.
- Thompson, T. E., & Conner, P. J. (2012). Pecan. In *Fruit breeding* (pp. 771-801). Springer, Boston, MA.

- Ugarte, O. M., Alfaro, M. R., Álvarez, A. M., Álvarez, J. E., de Aguiar Accioly, A. M., & Do Nascimento, C. W. A. (2015). El Níquel en suelos y plantas de Cuba. *Cultivos Tropicales*, 36, 25-33.
- Valentini, G.; Daorden, Ma. E. y Arroyo, L. (2010). Características de variedades de nogal Pecán en evaluación en la EEA San Pedro. Estación Experimental Agropecuaria San Pedro. 1-30 pp.
- Valenzuela, L. (2006). Comparaison interspécifique de la dynamique saisonnière de composés azotés et carbonés chez le chêne sessile (*Quercus petraea* Matt. Liebl), le chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) et le hêtre (*Fagus sylvatica* L.) aux stades juvéniles et adultes: Effet de la défoliation et de la lumière sur la gestion des réserves. Tesis Doctoral. 132 p.
- Valenzuela, N. L. M.; Gérant, D. ; Maillard, P. ; Bréda, N. J. J.; González, C. G. and Sánchez, C. I. (2011). Evidence for a 26kDA vegetative storage protein in the stem sapwood of mature pedunculate oak. *Interciencia*. 36(2):142-147.
- Valenzuela, L.; Maillard, P. ; González, J. y González, G. (2014). Balance de carbohidratos en diferentes compartimentos vegetales de encino (*Quercus petraea*) y haya (*Fagus sylvatica*), sometidos a defoliación y sombra. *Rev. Chapingo Ser. Zonas Aridas*. 13(1):33-38.
- Valenzuela Hormazábal, P. V., Hernández Rodríguez, E., & Morales, A. (2021). Implementación de una estrategia basada en métodos teóricocomputacionales para la búsqueda y diseño de nuevos inhibidores en la enzima ureasa de *Helicobacter pylori* (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Escuela de Ingeniería Civil en Bioinformática.).
- Wood, B. W., Reilly, C. C., & Nyczepir, A. P. (2004a). Mouse-ear of pecan: I. Symptomology and occurrence. *HortScience*, 39(1), 87-94.
- Wood, B. W., Reilly, C. C., & Nyczepir, A. P. (2004b). Mouse- ear of pecan: II. Influence of nutrient applications. *HortScience*, 39(1), 95-100.
- Wood, B. W., Reilly, C. C., & Nyczepir, A. P. (2004c). Mouse-ear of pecan: a nickel deficiency. *HortScience*, 39(6), 1238-1242.
- Yusuf, M., Fariduddin, Q. Hayat, S. and Ahmad, A. (2011). Nickel: An Overview of Uptake, Essentiality and Toxicity in Plants *Bull Environ Contam Toxicol* (2011) 86:1-17
- Zambelli, B., Berardi, A., Martin-Diaconescu, V., Mazzei, L., Musiani, F., Maroney, M. J., & Ciurli, S. (2014). Nickel binding properties of *Helicobacter pylori* UreF, an accessory protein in the nickel-based activation of urease. *Journal of Biological Inorganic Chemistry*, 19(3), 319-334. doi: 10.1007/s00775-013-1068-3

IV. ARTÍCULOS

Corrección de la sintomatología “oreja de ratón” en nogal pecanero con aplicaciones foliares de níquel

Correction of “mouse ear” symptoms in pecan with foliar applications of nickel

Mónica Hernández-López¹, Juan Carlos Rodríguez-Ortiz², Luis Guillermo Hernández-Montiel³,
Uriel Figueroa-Viramontes⁴, Gerardo Zapata-Sifuentes⁵ y Pablo Preciado-Rangel⁶✉

¹ Instituto Tecnológico Superior de Lerdo. Av. Tecnológico no. 1555 sur Periférico Gómez-Lerdo km 14.5. 35150 Cd. Lerdo, Durango, México.

² Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Carretera San Luis - Matehuala km 14.5, Ejido Palma de la Cruz. 78321 Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., México.

³ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. Av. Instituto Politécnico Nacional 195, Col. Playa Palo de Santa Rita Sur. 23096 La Paz, B.C.S., México.

⁴ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Laguna. Boulevard José Santos Valdez 1200, Colonia Centro. 27440 Matamoros, Coahuila, México.

⁵ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez, Col. Valle Verde. 27054 Torreón, Coahuila, México.

⁶ Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón - San Pedro de las Colonias km 7.5, Ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México.

✉ Autor para correspondencia (ppreciador@yahoo.com.mx)

RESUMEN

La deficiencia de níquel (Ni) en los árboles de nogal (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) afecta negativamente el crecimiento de hojas, el metabolismo del nitrógeno y de carbono durante la expansión del follaje y consecuente el rendimiento. La fertilización con micronutrientes al suelo es poco efectiva en suelos con alto contenido de carbonatos y pH alto. Evaluar el efecto de la aplicación foliar de níquel sobre el rendimiento, contenido nutricional y área foliar en hojas de nogal. En un diseño bloques al azar se asperjaron foliarmente cuatro dosis crecientes: 100, 150, 200 y 250 mg L⁻¹ y un testigo sin aplicación. Los resultados indican que la aspersión foliar de Ni corrige la anomalía conocida como oreja de ratón (aumento en el área foliar) e incrementa la absorción de este elemento inhibiendo la absorción del Cu y Mn. La aspersión de 100 mg L⁻¹ incrementó el rendimiento de nuez por árbol y el área foliar en hojas de nogal.

Palabra clave: área foliar, fertilización foliar, rendimiento.

SUMMARY

Nickel (Ni) deficiency in pecan trees (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) negatively affects leaf growth, nitrogen and carbon metabolism during foliage expansion, and consequently yield. Fertilization to the soil with micronutrients is ineffective in soils with high carbonate content and high pH. To evaluate the effect of foliar application of nickel on yield, nutritional content, and leaf area of pecan leaves, in a randomized block design four increasing doses were sprayed on foliage: 100, 150, 200 mg L⁻¹ and one control with no application. The results indicate that Ni foliar spraying corrects the abnormality known as mouse ear (increase in leaf area) and increases absorption of this element by inhibiting the absorption of Cu and Mn. Spraying 100 mg L⁻¹ increased leaf area and pecan yield per tree.

Index word: leaf area, foliar fertilization, yield.

Cita recomendada:

Hernández-López, M., J. C. Rodríguez-Ortiz, L. G. Hernández-Montiel, U. Figueroa-Viramontes, G. Zapata-Sifuentes y P. Preciado-Rangel. 2020. Corrección de la sintomatología “oreja de ratón” en nogal pecanero con aplicaciones foliares de níquel. Terra Latinoamericana 38: 833-840.

DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.791>

Recibido: 08 de mayo de 2020.

Aceptado: 04 de julio de 2020.

Publicado en Terra Latinoamericana 38: 833-840.

INTRODUCCIÓN

El nogal pacanero (*Carya illinoensis* (Wangh.) K. Koch) es una especie hortofrutícola de alta rentabilidad por lo que anualmente se incrementa la superficie dedicada a este frutal (Zaragoza-Lira *et al.*, 2011). México es el segundo productor de nueces en el mundo, con una superficie plantada de 113 000 ha, produciendo alrededor del 40% de la producción mundial y 56% del volumen comercializado internacionalmente, los principales estados productores se sitúan en el norte del país y son Chihuahua, Coahuila, Sonora, Durango y Nuevo León (SIAP, 2016), estos estados se caracterizan por tener suelos calcáreos con un alto contenido de carbonatos y pH, lo que limita la biodisponibilidad de algunos nutrimentos especialmente los micronutrientes (Vargas y Arreola, 2008); es por eso que el manejo de la nutrición es de suma importancia para obtener altos rendimientos (Salas-Rivera *et al.*, 2018). Al respecto este cultivo demanda altos suministros de NPK y Zn (Hernández-Rodríguez *et al.*, 2017). Sin embargo, en los últimos tiempos se han observado deficiencias severas de níquel (Ni) lo cual puede provocar distorsiones o alteraciones de crecimiento en el follaje, sintomatología comúnmente conocida como “oreja de ratón” (Rodríguez-Jiménez *et al.*, 2016), la cual consiste en una necrosis de las puntas de los folíolos, causando que estos sean pequeños y redondeados, disminuyendo así el área foliar y el rendimiento del árbol (Ojeda-Barrios *et al.*, 2009). El Ni desde el 2004 es considerado esencial para las plantas por la Asociación Americana de Control de Nutrientes Vegetales (Bai *et al.*, 2007). Este elemento es requerido en bajas concentraciones por los cultivos y en altas concentraciones es fitotóxico (Almanza *et al.*, 2009; Muñoz-Ugarte *et al.*, 2015). El Ni es tomado como catión Ni^{+2} y es absorbido rápidamente a los sitios metabólicamente activos de la planta (Díaz-Aguilar *et al.*, 2001). Este elemento actúa como catalizador y componente de la enzima ureasa (Bai *et al.*, 2007). La deficiencia de este elemento interrumpe la asimilación de N y el C durante el proceso de la expansión del follaje (Bai *et al.*, 2007). La carencia de este elemento inhibe la acción de la ureasa, provocando la acumulación de urea, causando la aparición de manchas necróticas en las hojas (Wood *et al.*, 2006). Además, su deficiencia puede interrumpir el metabolismo de ureidos, aminoácidos y ácidos orgánicos, y acumular ácidos oxaláticos y lácticos (Malavolta y Moraes, 2007). El nogal pecanero es

una especie que transportan el N como ureidos y la ausencia de Ni en estos árboles afecta el metabolismo de ureidos, amidas y la composición de la savia en el xilema (Mayz-Figueroa, 2004). Bajo esta perspectiva el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación foliar de níquel sobre el rendimiento, el contenido nutrimental y el área foliar en hojas de nogal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

El presente proyecto se llevó a cabo en la pequeña propiedad “Tierra Blanca”, en el municipio de Matamoros, Coahuila, localizado en las coordenadas 25° 20' 28" N y 102° 48' 16" O. El suelo es de textura limo-arcillosa, con un pH de 7.4, materia orgánica de 2.4%.

Manejo de la Huerta

Se utilizaron árboles de 63 años de edad, de la variedad “Squirrel Delight”. La huerta esta plantada en un sistema de marco real a 14 por 14 m, con una densidad de 50 árboles por hectárea. El riego de la huerta es por goteo mediante cintilla enterrada a 40 cm; la lámina total es de 120 cm al año, aplicada desde el 1 de marzo hasta el 15 de octubre. Se realizó una fertilización semanal de N al suelo, con una dosis de 31 kg ha⁻¹ de urea, de abril a julio. Se realizaron cinco aplicaciones de nutrientes al follaje, enfocados a abastecer de Zn a los árboles, con una solución que contenía 3 kg de sulfato de Zn, 1 kg de sulfato de Mn y 5 kg de urea libre de Biuret en 1000 L ha⁻¹ de agua, dichas aplicaciones son las que se manejan cada año en esta huerta. Se aplicaron insecticidas para el control del barrenador de la nuez (*Acrobasis nuxvorella*), barrenador de ruezno (*Cydia caryana*) y pulgón amarillo (*Melanaphis sacchari*).

Tratamientos

Se seleccionaron 25 árboles de la parte media de la huerta, todos con síntomas visibles de deficiencia de Ni. Los tratamientos consistieron en un testigo y cuatro dosis de Ni, aplicados en tres fechas sobre los mismos árboles. Se utilizó diseño en bloques al azar, con cinco repeticiones, siendo un árbol una unidad experimental.

Los tratamientos consistieron en la aplicación foliar del fertilizante comercial Speedfol Pecano SP[®] (SQM), en concentraciones de 100, 150, 200 y 250 mg L⁻¹ y un testigo sin aplicación. El fertilizante comercial de Ni, presenta la siguiente composición: N 5% P₂O₅ 2%, K₂O 18%, MgO 4.2% y NiO 5.4%. Las fechas de aplicación fueron: 1) 20 de abril, antes de la floración, 2) 9 de mayo, en el crecimiento de frutos, y 3) 24 de junio durante el estadio acuoso de la nuez. Las aspersiones se realizaron con una maquina aspersora marca UNIGREEN AIRDROP T20C. CARBO 153.MOV y se realizaron en el transcurso de la mañana (8 a 10 AM); en cada aspersión se cubrió completamente el follaje hasta el punto de rocío. En todas las formulaciones, se añadió 0.1% de urea como ion transportador y 0.02% de Tween 20 como agente tensioactivo, el pH de las soluciones asperjadas fue ajustado con ácido sulfúrico entre 6-6.5.

Muestreo y Análisis Foliar

El análisis foliar es una técnica muy utilizada para relacionar la concentración de los nutrimentos en el tejido foliar y el rendimiento o desarrollo de la planta. Se realizaron tres muestreos foliares para evaluar el efecto de los tratamientos, los cuales se llevaron a cabo 15 días después de cada fecha de aplicación de tratamientos. Los muestreos se realizaron en los cuatro puntos cardinales de la parte media del árbol y se tomó el tercer par de folíolos de los brotes seleccionados; para cada muestra se tomaron alrededor de 80 folíolos por árbol. Las hojas obtenidas en los diferentes muestreos se utilizaron para determinar el verdor de la hoja, área foliar y las concentraciones foliares de N, P, K, Ca, Mg, Zn, Mn, Ni, Cu. Las muestras colectadas fueron analizadas en el Laboratorio de análisis de Suelo, Agua y Planta del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Matamoros, Coahuila. Las hojas fueron lavadas con agua corriente, posteriormente con agua desionizada, dejándolas a secar a temperatura ambiente, posteriormente fueron introducidas a una estufa de circulación forzada de aire a 60 °C hasta seco constante y se molieron utilizando un tamiz malla. En estas muestras se determinó la concentración de K, Ca, Mg, Zn, Mn, Ni, y Cu mediante espectroscopía de absorción atómica, N por el método Kjeldahl y P por espectroscopía UV-Vis (Jones, 2017). El área foliar fue determinado, después de la última aplicación de

los tratamientos. La medición se realizó en una muestra de 25 hojas por árbol y se utilizó un medidor de área foliar portátil (Li-Cor 3000).

Rendimiento de Nuez y Porcentaje de Almendra

Se evaluó la producción de nuez por árbol. Una muestra de 30 nueces por repetición se secó en estufa de aire forzado a 65 °C hasta peso constante, luego se pesaron en seco, se descascararon y se pesó por separado la almendra para obtener el porcentaje de almendra (Wood, 2002).

Análisis Estadístico

Para cumplir con los supuestos de normalidad, los datos de la variable porcentaje de almendra se transformaron mediante arcoseno y posteriormente resultados obtenidos incluido esta variable fueron sometidos a un análisis de varianza para determinar las diferencias entre los tratamientos y donde se detectó diferencia significativa, se utilizó la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher con un nivel de significación de 5% ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento y Porcentaje de Almendra

La aplicación de Ni en las concentraciones evaluadas afectó el rendimiento, no así el peso de nuez o el porcentaje de almendra con respecto al testigo (Cuadro 1). El rendimiento de la huerta en general fue bajo, de 11 a 27 kg árbol⁻¹, debido a que ese año fue de baja producción (alternancia). Se obtuvo el mayor rendimiento en la dosis de 100 mg L⁻¹ con 1.3 Mg ha⁻¹, lo cual se encuentra por debajo de la media nacional que es de 1.76 Mg ha⁻¹ de las variedades Western y Wichita (SIAP, 2009). En el peso por nuez y porcentaje de almendra existió menos variación, con valores de 6 a 6.3 g nuez⁻¹ y de 45.1 a 49.2% de almendra; los valores anteriores son menores al promedio de las variedades Western y Wichita, que son las de mayor presencia en las zonas productoras del norte del país (Orona-Castillo *et al.*, 2013) debido entre otras características a que presentan una mayor concentración de compuesto bioactivos en la almendra (Flores-Cordova *et al.*, 2017), con más de 7 y 9 g nuez⁻¹, respectivamente y más de 55% de almendra (Ojeda-Barrios *et al.*, 2016).

Cuadro 1. Efecto de la aspersión foliar con níquel (Ni) sobre el rendimiento, peso de nuez y almendra de nuez.**Table 1. Effect of foliar spraying with nickel (Ni) on pecan yield, total weight, and shelled pecan weight.**

| Níquel | Rendimiento | Peso de una nuez | Porcentaje de almendra |
|--------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| mg L ⁻¹ | kg árbol ⁻¹ | g | % |
| 0 | 15.9ab [†] | 5.96a | 47.4a |
| 100 | 26.8a | 6.16a | 47.4a |
| 150 | 15.83ab | 6.33a | 45.1a |
| 200 | 16.9ab | 6.29a | 49.2a |
| 250 | 11.0b | 6.12a | 44.8a |

[†] Promedios con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes, según la prueba de Fisher ($P \leq 0.05$).

[†] Averages with different letters in the same column are statistically different, according to Fisher's test ($P \leq 0.05$).

De acuerdo con Wood (2002), la calidad de la nuez está fuertemente relacionada con un buen abastecimiento nutrimental, sin embargo, la aplicación de Ni no influyó en el porcentaje de almendra. Altas concentraciones de Ni también pueden ocasionar un bajo rendimiento en nogal, debido a una posible toxicidad de este elemento. La dosis con 250 mg L⁻¹ de Ni presenta un rendimiento de 11 kg árbol⁻¹, quedando incluso por debajo del testigo con 15.9 kg árbol⁻¹; sin embargo, el área foliar se incrementó de 130.55 a 304.25 cm² (Cuadro 5), corrigiéndose así la sintomatología conocida como oreja de ratón.

Análisis Foliar

El análisis foliar determina el estado nutricional de la planta, en el presente estudio, se encontraron diferencias significativas en la concentración foliar de nutrimentos después de la aplicación de Ni (Cuadro 1-3). Los valores encontrados para los nutrientes están dentro del rango de suficiencia recomendado por Medina-Morales (2004). El Ni tiene relación con el Fe, Zn, Cu y Mn (así como con N y P a través de la interacción de Ni en las vías bioquímicas que son críticas para brotación, formación de dosel y formación de frutos de nuez (Wood *et al.*, 2004).

En el primer muestreo foliar, a los 15 días después de la primera aplicación de Ni, existió una menor concentración de N, P, Zn y Mn en las hojas, con la aspersión de Ni. Diversos estudios demuestran que el Cu, Mn y Zn están estrechamente relacionados, debido a que concentraciones elevadas de estos micronutrientes inhiben la absorción de Ni o viceversa debido a la competencia entre estos cationes divalentes por los sitios de absorción en raíces y hojas, por lo cual no es recomendable hacer aplicaciones foliares de estos micronutrientes con el Ni (Wagle *et al.*, 2011). Con respecto a K y Ca, la concentración fue mayor en los árboles tratados con Ni. La concentración de Mg no mostró diferencias significativas con respecto al testigo, mientras que en Cu si mostró diferencias significativas entre dosis de Ni, pero no con el testigo (Cuadro 2). En el caso de Ni, las dosis de 150 mg L⁻¹ o más, tuvieron mayor concentración de Ni en las hojas,

Cuadro 2. Efecto de la aspersión foliar de níquel (Ni) antes de la floración, sobre la composición mineral de hojas de nogal (20 de abril).**Table 2. Effect of nickel (Ni) foliar spraying before flowering on mineral composition of pecan leaves (April 20).**

| Ni | N | P | K | Ca | Mg | Zn | Ni | Mn | Cu |
|--------------------|---------------------|---------|---------|---------|------|---------------------|-------|------|-------|
| mg L ⁻¹ | g kg ⁻¹ | | | | | mg kg ⁻¹ | | | |
| 0 | 3.62 a [†] | 0.17a | 1.43 b | 0.59 b | 0.39 | 230 a | 5 c | 93 a | 13 ab |
| 100 | 2.81 b | 0.11 b | 1.86 a | 0.97 ab | 0.35 | 130 b | 29 bc | 92 b | 15 a |
| 150 | 2.80 b | 0.11 b | 1.50 ab | 0.87 ab | 0.32 | 130 b | 49 a | 95 b | 14 ab |
| 200 | 2.61 b | 0.11 b | 1.71 ab | 1.05 a | 0.38 | 140 b | 57 a | 93 b | 10 b |
| 250 | 2.75 b | 0.12 ab | 1.51 ab | 1.11 a | 0.36 | 140 b | 43 ab | 93 b | 11 b |

[†] Promedios con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes, según la prueba de Fisher ($P \leq 0.05$).

[†] Averages with different letters in the same column are statistically different, according to Fisher's test ($P \leq 0.05$).

el cual se considera esencial para algunas plantas superiores como el nogal pecanero y es necesario para la actividad de la enzima ureasa (Mengel y Kirkby, 2001), la cual cataliza una reacción bioquímica para dejar disponible el nitrógeno (Caldwell, 2005; Carpa, 2009), incrementando así el área foliar debido a la mayor disponibilidad de este (Peil y Gálvez, 2012).

Para la segunda aplicación de Ni, el análisis foliar registró tendencias similares al primer análisis, observándose una menor concentración de N, P, Zn y Mn en los árboles tratados con Ni (Cuadro 3). La baja concentración de N en hojas, se debe a que existe un incremento en el área foliar (Cuadro 5) ya que, al existir una mayor superficie, el N contenido se extiende sobre una mayor área (Bai *et al.*, 2006). En el caso de Ca también hubo un incremento al aplicar Ni, pero solo en la dosis mayor de Ni fue significativamente mayor. La concentración de K, Mg y Cu no varió de manera significativa (Cuadro 3). Al igual que con la primera aplicación, la concentración de Ni se incrementó en las dosis de 150 mg L⁻¹ o más de Ni al follaje.

En el tercer análisis foliar, durante el estadio acuoso de la nuez, se observó nuevamente una menor concentración de N y P en los árboles tratados con Ni, esto se debe a que existe una menor concentración de N en un área foliar más grande y posiblemente un efecto de dilución, no así para Zn y Mn, que en este caso no variaron significativamente con respecto al testigo (Cuadro 4). El K tampoco mostró diferencias significativas entre tratamientos, de manera similar al segundo análisis. El Ca tuvo una mayor concentración

en todos los tratamientos de Ni, con un promedio de 1.59% comparado con 0.62% en el testigo (Cuadro 4), esto es debido a que existe un antagonismo directo entre Ni y Mn en el cual, la presencia de Ni disminuye las concentraciones de Mn y éste a su vez aumenta las concentraciones de Ca (Medina-Morales *et al.*, 1999). En Cu, solo el tratamiento de 200 mg L⁻¹ tuvo una concentración mayor que el testigo, con valores de 21 y 10 mg kg⁻¹, respectivamente, sin embargo, se debe considerar la concentración de este elemento, debido a que su presencia, disminuye la concentración del Ni y viceversa (Wagle *et al.*, 2011).

En el caso de Ni, los tratamientos de 200 y 250 mg L⁻¹ tuvieron una mayor concentración que el testigo, con valores de 13, 19 y 3 mg kg⁻¹ respectivamente (Cuadro 4), quedando por encima de los valores de suficiencia de Ni (7 mg kg⁻¹) establecidos por (Wood, 2002).

Área Foliar

Se determinó el área foliar de las hojas que presentaban sintomatología de “oreja de ratón” obteniendo una media de 137.95 cm² en hojas deficientes de Ni, después de realizar las aplicaciones foliares de níquel se incrementó significativamente (2.16 veces más) el área foliar (Figura 1, Cuadro 5), lo anterior coincide con lo indicado por Ruter (2005), el cual logró incrementos significativos en el área foliar con aplicaciones de sulfato de níquel. Wood *et al.* (2003) indica que la aplicación foliar de níquel

Cuadro 3. Efecto de la aspersión foliar de níquel, sobre la composición mineral de hojas de nogal en el crecimiento de frutos (23 de mayo).

Table 3. Effect of nickel foliar spraying on the mineral composition of pecan leaves on fruit growth (May 23).

| Ni | N | P | K | Ca | Mg | Zn | Ni | Mn | Cu |
|--------------------|--------------------|---------|--------|---------|--------|---------------------|-------|-------|------|
| mg L ⁻¹ | g kg ⁻¹ | | | | | mg kg ⁻¹ | | | |
| 0 | 3.61a [†] | 0.172 a | 1.61 a | 0.58 b | 0.40 a | 210 a | 4 c | 173 a | 15 a |
| 100 | 2.75 b | 0.070 c | 1.84 a | 0.89 ab | 0.38 a | 180 b | 14 bc | 80 b | 14 a |
| 150 | 2.84 b | 0.079 c | 1.77 a | 0.86 ab | 0.33 a | 160 b | 17 ab | 75 b | 14 a |
| 200 | 2.71 b | 0.079 c | 1.54 a | 0.99 ab | 0.35 a | 150 b | 21 ab | 57 b | 14 a |
| 250 | 2.69 b | 0.121 b | 1.66 a | 1.06 a | 0.37 a | 160 b | 25 a | 65 b | 14 a |

[†] Promedios con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes, según la prueba de Fisher ($P \leq 0.05$).

[†] Averages with different letters in the same column are statistically different, according to Fisher's test ($P \leq 0.05$).

Cuadro 4. Efecto de la aspersión foliar de níquel (Ni), sobre la composición mineral de hojas de nogal durante el estado acuoso de la nuez (24 de junio).

Table 4. Effect of nickel (Ni) foliar spraying on the mineral composition of pecan leaves during the aqueous state of the pecan (June 24).

| Ni | N | P | K | Ca | Mg | Zn | Ni | Mn | Cu |
|--------------------|---------------------|--------|--------|--------|---------|---------------------|-------|------|-------|
| mg L ⁻¹ | g kg ⁻¹ | | | | | mg kg ⁻¹ | | | |
| 0 | 2.70 a [†] | 0.14 a | 1.29 a | 0.62 b | 0.31 ab | 133 a | 3 b | 56 a | 21 a |
| 100 | 2.09 bc | 0.05 b | 1.18 a | 1.55 a | 0.23 b | 94 a | 10 ab | 53 a | 11 b |
| 150 | 2.25 bc | 0.05 b | 1.18 a | 1.58 a | 0.33 a | 117 a | 12 ab | 50 a | 13 ab |
| 200 | 2.01 c | 0.05 b | 1.29 a | 1.69 a | 0.38 a | 102 a | 13 a | 31 a | 10 b |
| 250 | 2.29 b | 0.06 b | 1.24 a | 1.55 a | 0.35 a | 123 a | 19 a | 36 a | 9 b |

[†] Promedios con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes, según la prueba de Fisher ($P \leq 0.05$).

[†] Averages with different letters in the same column are statistically different, according to Fisher's test ($P \leq 0.05$).

corrige satisfactoriamente la sintomatología de la oreja del ratón en árboles de nogal; ya que este elemento es necesario para la actividad de la enzima ureasa y en su ausencia se produce una necrosis marginal, debido una alta acumulación de urea a lo largo de los márgenes del follaje (Eskew *et al.*, 1983; Krogmeier

et al., 1989). López (2012) señala que la aplicación de níquel al cultivo de arveja incrementa significativamente el área foliar y afecta positivamente la metabolización de la urea (Bonilla, 2000; Epstein y Bloom, 2005), lo que favorece la conversión del N-ureico a N-orgánico o aminoácidos.

Cuadro 5. Área foliar de hojas de nogal con deficiencia (muestreo 10 de abril) y suficiencia de níquel (muestreo 20 de octubre).

Table 5. Foliar area of pecan leaves with deficiency (sampling April 10) and sufficiency (sampling October 20).

| Ni | AA (HD) | DA (HS) |
|--------------------|-----------------|-----------------------|
| mg L ⁻¹ | cm ² | |
| 0 | 150.63 b | 171.33 b [†] |
| 100 | 152.32 b | 289.82 a |
| 150 | 128.11 b | 321.29 a |
| 200 | 133.17 b | 287.05 a |
| 250 | 130.55 b | 304.25 a |

[†] Promedios con letras diferentes en columnas adyacentes son estadísticamente diferentes según la prueba de Fisher ($P \leq 0.05$). Ni = níquel; AA = antes de la aplicación de níquel (HD = hojas deficientes). DA = después de aplicación foliar de Ni (HS = hojas con suficiencia).

[†] Averages with different letters in adjacent columns are statistically different according to Fisher's test ($P \leq 0.05$). Ni = nickel; AA = prior to nickel application (HD = nickel-deficient leaves). DA = after Ni foliar application (HS = nickel-sufficient leaves).

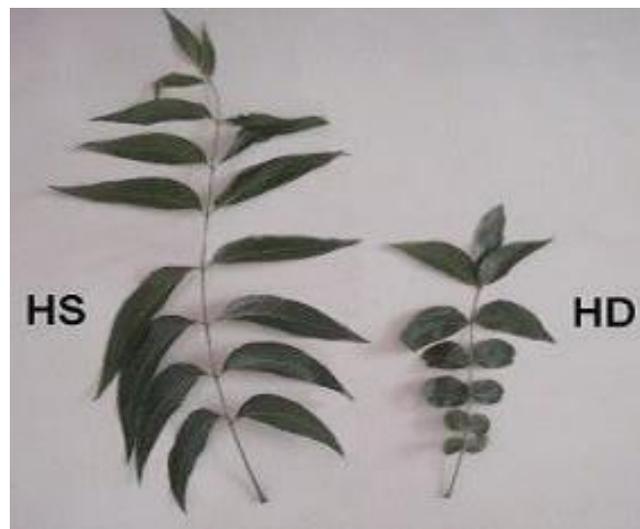


Figura 1. Efecto de la aspersión foliar de níquel (Ni) sobre el área foliar de folíolos de nogal. HS = hojas con suficiencia de Ni; HD = hojas con deficiencia de Ni (150 mg L⁻¹ de Ni).

Figure 1. Effect of nickel (Ni) foliar spraying on the leaf area of pecan leaflets. HS = Ni-sufficient leaves; HD = Ni-deficient leaves (150 mg L⁻¹ Ni).

CONCLUSIONES

- La aspersión foliar de níquel corrige la deficiencia de este elemento y la anomalía conocida como “oreja de ratón” en hojas de nogal, ya que incrementa el área foliar y se obtienen concentraciones adecuadas de níquel en hojas de nogal.
- Bajo las condiciones de este trabajo se recomienda utilizar la dosis de 100 mg L⁻¹, la cual registra mayor rendimiento, corrige la deficiencia de este elemento e incrementa el área foliar.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

Durante el desarrollo de la investigación, todos los autores participaron con aportaciones importantes de acuerdo a su experiencia y con un fundamento ético en su proceder.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos presentados en la contribución están disponibles en su totalidad, previa solicitud razonable al Dr. Pablo Preciado Rangel, correo electrónico (ppreciador@yahoo.com.mx)

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno de los autores integrantes, tienen intereses en competencia que declarar.

FONDOS

Nada que declarar.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Mónica Hernández-López, Uriel Figueroa-Viramontes. Metodología: Pablo Preciado-Rangel. Software: Juan Carlos Rodríguez-Ortiz. Validación: Gerardo Zapata-Sifuentes. Análisis formal: Mónica Hernández-López. Investigación: Uriel Figueroa-Viramontes. Recursos: Mónica Hernández-López. Curación de datos: Luis Guillermo Hernández-

Montiel. Escritura: preparación del borrador original. Mónica Hernández-López, Pablo Preciado-Rangel. Escritura: revisión y edición: Pablo Preciado-Rangel. Visualización: Luis Guillermo Hernández-Montiel. Supervisión: Uriel Figueroa-Viramontes. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por los conocimientos brindados. Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental La Laguna por el uso de sus laboratorios y a la P.P Casa Blanca por permitir desarrollar el proyecto en sus instalaciones.

LITERATURA CITADA

- Almanza, P. J., H. A. Rojas, G. del C. Borda, A. R. Galindo, D. R. Galindo. 2009. Aplicación foliar de níquel en Cucurbita ficifolia Bouché para producción de ureasa (EC 3.5. 1.5) cristalina. *Agron. Colomb.* 27: 33-40.
- Bonilla, I. 2000. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. pp. 83-97. *In: J. Azcón B. y M. Talón (eds.). Fundamentos de fisiología vegetal.* Mc Graw Hill Interamericana. Barcelona, España.
- Bai, C., C. C. Reilly, and B. W. Wood. 2006. Nickel deficiency disrupts metabolism of ureides, amino acids, and organic acids of young pecan foliage. *Plant Physiol.* 140: 433-443. doi: <https://doi.org/10.1104/pp.105.072983>.
- Bai, C., C. C. Reilly, and B. W. Wood. 2007. Nickel deficiency affects nitrogenous forms and urease activity in spring xylem sap of pecan. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 132: 302-309. doi: <https://doi.org/10.21273/JASHS.132.3.302>.
- Caldwell, B. A. 2005. Enzyme activities as a component of soil biodiversity: A review. *Pedobiología* 49: 637-644. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2005.06.003>.
- Carpa, R. 2009. Enzymological research on soils from different environments. *Ann. Roman. Soci. Cell Biol.* 16: 44-48.
- Díaz Aguilar, I., M. Larqué Saavedra, G. Alcantar González, A. Vázquez Alarcón, F. González Cossio y R. Carrillo González. 2001. Acumulaciones tóxicas de níquel en el crecimiento y la nutrición de trigo. *Terra* 19: 199-209.
- Epstein, E. and A. J. Bloom. 2005. Mineral nutrition of plant: Principles and perspectives. Sinauer Associates. Sunderland, MA, USA. ISBN: 9780878931729.
- Eskew, D. L., R. M. Welch, and E. E. Cary. 1983. Nickel: An essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. *Science* 222: 621-623. doi: <https://doi.org/10.1126/science.222.4624.621>.
- Flores-Cordova, M., E. Sánchez, E. Muñoz-Márquez, D. L. Ojeda-Barrios, J. M. Soto-Parra, and P. Preciado-Rangel. 2017. Phytochemical composition and antioxidant capacity in Mexican pecan nut. *Emir. J. Food Agric.* 29: 346-350. doi: <https://doi.org/10.9755/ejfa.EJFA-2016-08-1075>.

- Hernández Rodríguez, O. A., C. H. Rivera Figueroa, E. E. Díaz Ávila, D. L. Ojeda Barrios, and V. M. Guerrero Prieto. 2017. Plant and livestock waste compost compared with inorganic fertilizer: nutrient contribution to soil. *Terra Latinoamericana* 35: 321-328.
- Jones, J. B. 2017. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC press. Boca Raton, FL, USA. ISBN-13: 978-1138424388.
- Krogmeier, M. J., G. W. McCarty, and J. M. Bremner. 1989. Phytotoxicity of foliar-applied urea. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 86:8189-8191. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.86.21.8189>.
- López Murcia, M. Á. 2012. Respuesta del cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) a la aplicación de níquel. *Rev. UDCA Act. Divul. Cient.* 15: 357-362. doi: <https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n2.2012.835>.
- Malavolta, E. y M. F. Moraes. 2007. Níquel-de nutriente tóxico a nutriente esencial. *Inf. Agron.* 10-12.
- Mayz-Figueroa, J. 2004. Fijación biológica de nitrógeno. *Rev. Cient. UDO Agrícola* 4: 1-20.
- Medina-Morales, M. C. 2004. Normas DRIS preliminares para nogal pecanero. *Terra Latinoamericana* 22: 445-450.
- Medina-Morales, M. C., E. J. Moreno, J. H. Aguilar Pérez y S. J. García Garza. 1999. Aspersiones foliares de manganeso y cobre en nogal pecanero. *Terra* 17: 317-323.
- Mengel, K. and E. A. Kirkby. 2001. Principles of plant nutrition. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. ISBN: 978-0-7923-7150-2.
- Ojeda-Barrios, D. L., O. A. Hernández-Rodríguez, J. Martínez-Téllez, A. Núñez-Barrios y E. Perea-Portillo. 2009. Aplicación foliar de quelatos de zinc en nogal pecanero. *Rev. Chapingo. Ser. Hortic.* 15: 205-210.
- Ojeda-Barrios, D., E. Sánchez-Chávez, J. P. Sida-Arreola, R. Valdez-Cepeda, and M. Balandran-Valladares. 2016. The impact of foliar nickel fertilization on urease activity in pecan trees. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 16: 237-247. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000019>.
- Orona-Castillo, I., D. M. Sangerman-Jarquín, M. Fortis Hernández, C. Vázquez Vázquez y M. Á. Gallegos Robles. 2013. Producción y comercialización de nuez pecanera (*Carya illinoensis* Koch) en el norte de Coahuila, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4: 461-476.
- Peil, R. M. y J. L. Gálvez. 2012. Reparto de materia seca como factor determinante de la producción de las hortalizas de frutocultivadas en invernadero. *Current Agric. Sci. Technol.* 11: 5-11. doi: <https://doi.org/10.18539/cast.v11i1.1171>.
- Rodríguez-Jiménez, T. J., D. L. Ojeda-Barrios, F. Blanco-Macías, R.D. Valdez-Cepeda y R. Parra-Quezada. 2016. Ureasa y níquel en la fisiología de las plantas. *Rev. Chapingo. Ser. Hortic.* 22:69-82. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2014.11.051>.
- Ruter, J. M. 2005. Effect of nickel applications for the control of mouse ear disorder on river birch. *J. Environ. Hortic.* 23: 17- 20. doi: <https://doi.org/10.24266/0738-2898-23.1.17>.
- Salas-Rivera, R., L. A. Valdez-Aguilar, R. H. Lira-Saldívar, L. Ibarra-Jiménez y A. Cárdenas-Flores. 2018. Aspersiones foliares con nutrimentos vs. el rajado de nuez en nogal pecanero *Carya illinoensis*. *Acta Univ.* 28: 1-8. doi: <https://doi.org/10.15174/au.2018.1695>.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2009. Anuario estadístico de la producción agrícola. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp (Consulta: febrero 09, 2018).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2016. Altas Agroalimentario 2016. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016. (Consulta: agosto 10, 2019).
- Muñiz-Ugarte, O., M. Rodríguez-Alfaro, A. Montero-Álvarez, J. Estévez-Álvarez, A. M. de Aguiar-Accioly y C. W. Araujo-DoNascimento. 2015. El níquel en suelos y plantas de Cuba. *Cult.Tropic.* 36: 25-33.
- Vargas P., G. y J. G. Arreola Á. 2008. Respuesta del nogal pecanero (*Carya illinoensis* K. Koch) a las aplicaciones foliares de nutrimentos. *Rev. Chapingo Ser. Zonas Áridas.* 7: 7-14.
- Wagle, P., M. W. Smith, B. W. Wood, and C. T. Rohla. 2011. Response of young bearing pecan trees to spring foliar nickel applications. *J. Plant Nutr.* 34: 1558-1566. doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.585210>.
- Wood, B. W. 2002. Late nitrogen fertilization in pecan orchards. A review. pp. 47-59. *In: A review. Proceedings 36th. Western pecan conference.* Las Cruces, NM, USA.
- Wood, B. W., C. C. Reilly, and A. Nyczepir. 2003. Nickel correctsmouse-ear. *Pecan Grower* 15: 3-8.
- Wood, B. W., C. C. Reilly, and A. P. Nyczepir. 2004. Mouse-ear of pecan: A nickel deficiency. *HortScience* 39: 1238-1242. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.39.6.1238>.
- Wood, B. W., R. Chaney, and M. Crawford. 2006. Correcting micronutrient deficiency using metal hyperaccumulators: Alyssum biomass as a natural product for nickel deficiency correction. *HortScience* 41: 1231-1234. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.5.1231>.
- Zaragoza-Lira, M. M., P. Preciado-Rangel, U. Figueroa-Viramontes, J. L. García-Hernández, M. Fortis-Hernández, M. Á. Segura- Castruita, Á. Lagarda-Murrieta y E. Madero-Tamargo. 2011. Aplicación de composta en la producción de nogal pecanero. *Rev. Chapingo. Ser. Hortic.* 17: 33-34.

Análisis de la correlación nutrimental por aplicación foliar de níquel en Nogal pecanero con sintomatología “Oreja de ratón”

Analysis of nutritional correlation by foliar application of nickel in peca with "mouse ear" symptomatology

Mónica Hernández-López^{1,2*}(0000-0001-6249-127X), Vicente de Paul Álvarez-Reyna³(0000-0001-6748-2938), Ángel Lagarda-Murrieta³(), Pablo Preciado-Rangel⁴(0000-0002-3450-4739), Uriel Figueroa-Viramontes⁵(0000-0003-0112-8447).

1. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Periférico Raúl López Sánchez, Valle Verde. 27054 Torreón, Coahuila, México. Posgrado en Ciencias Agrarias

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

3 Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Periférico Raúl López Sánchez, Valle Verde. 27054 Torreón, Coahuila, México.

4 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Torreón. Torreón - San Pedro de las Colonias km 7.5, Ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México.

5 Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental La Laguna. Boulevard José Santos Valdez 1200, Colonia Centro. 27440 Matamoros, Coahuila, México

* Autor para correspondencia: monica.hl@itslerdo.edu.mx cel: 8712394666

RESUMEN

El nogal pacanero en México representa una actividad de gran importancia económica, donde existen 5 entidades productoras, encontrándose el estado de Coahuila dentro de ellas con un 12.5 % de producción. El níquel desde el 2004 es considerado esencial para las plantas por la Asociación Americana de Control de Nutrientes Vegetales. En los últimos tiempos se han observado deficiencias severas de níquel (Ni) lo cual puede provocar distorsiones o alteraciones de crecimiento en el follaje, sintomatología comúnmente conocida como “oreja de ratón”. El presente estudio es evaluar la correlación que existe entre el níquel con los micro y macro elementos y área foliar en hojas de nogal. Se utilizó un diseño bloques al azar con cuatro dosis crecientes: 100, 150, 200 y 250 mg L⁻¹ y un testigo sin aplicación. Los resultados indican que

existe correlación de Ni con los siguientes elementos N, Ca, Zn, Mn y Cu sobre todo en la etapa de crecimiento de fruto y que la aspersión foliar de Ni corrige la anomalía conocida como oreja de ratón (aumento en el área foliar) e incrementa la absorción de este elemento inhibiendo la absorción del Cu y Mn. La aspersión de 100 mg L⁻¹ incrementó el rendimiento de nuez obteniendo 26.8 kg árbol⁻¹ y la aspersión de 150 mg L⁻¹ obtuvo los valores más altos del área foliar en hojas de nogal con un valor de 321.29 cm².

PALABRA CLAVE ADICIONALES: área foliar, fertilización foliar, rendimiento

ABSTRACT

The pecan tree in Mexico represents an activity of great economic importance, where there are 5 producing entities, the state of Coahuila being one of them with 12.5% of production. Nickel since 2004 is considered essential for plants by the American Plant Nutrient Control Association. In recent times, severe deficiencies of nickel (Ni) have been observed, which can cause distortions or alterations in foliage growth, a symptom known as "mouse ear". The present study is to evaluate the connections that exist between nickel with the micro and macro elements and the leaf area in walnut leaves. A randomized block design with four increasing doses was drawn: 100, 150, 200 and 250 mg L⁻¹ and a control without application. The results indicate that there are connections of Ni with the following elements N, Ca, Mn and Cu, especially in the fruit growth stage and that foliar spraying of Ni corrects the anomaly known as mouse ear (increase in leaf area) and increases the absorption of this element by inhibiting the absorption of Cu and Mn. The spray of 100 mg L⁻¹ increased the walnut yield obtaining 26.8 kg tree⁻¹ and the spray of 150 mg L⁻¹ obtained the highest values of leaf area in walnut leaves with a value of 321.29 cm².

ADDITIONAL KEY WORDS: leaf area, foliar fertilization, yield.

INTRODUCCIÓN

El nogal pecanero en México representa una actividad de gran importancia económica para el país, con una producción de 38 mil 660 toneladas por año, donde las cinco principales entidades productoras de nuez en el país fueron: Chihuahua, con 45.6 %; Sonora, 25.4 %; Coahuila, 12.5 %; Nuevo León, 7.6 %, e Hidalgo, 3.8 %. (SIAP 2016). El Ni desde el 2004 es considerado

esencial para las plantas por la Asociación Americana de Control de Nutrientes Vegetales (Bai et al., 2007). El Ni participa en el metabolismo de los aminoácidos y carbono (Bai et al., 2006); contribuye al reciclamiento de H₂ producto de la fijación simbiótica del N por ser parte de la enzima hidrogenasa, por lo tanto, un nivel bajo de Ni en los suelos agrícolas afecta la fijación simbiótica del N en leguminosas (Ruiz et al., 2000). En los últimos tiempos se han observado deficiencias severas de níquel (Ni) lo cual puede provocar distorsiones o alteraciones de crecimiento en el follaje, sintomatología comúnmente conocida como “oreja de ratón” (Rodríguez-Jiménez et al., 2016), la cual consiste en una necrosis de las puntas de los folíolos, causando que estos sean pequeños y redondeados, disminuyendo así el área foliar y rendimiento del árbol (Ojeda Barrios et al., 2009). Brown (2006) indicó que los factores principales que provocan una deficiencia de Ni en los cultivos son: 1) excesos de Cu y Zn que inhiben por competencia la absorción de Ni por las raíces, 2) pH del suelo mayor de 6.5 que aumenta los compuestos poco solubles de óxidos de Ni, 3) suelos con altos contenidos de Fe, Mn, Ca y Mg, 4) dosis excesivas de N o de cal agrícola, 5) niveles altos de P en el suelo que incrementan la formación de fosfato de Ni y, 6) inhibición de la enzima ureasa por la acumulación de Cu en las plantas. Bajo esta perspectiva el objetivo del presente estudio fue la aplicación foliar de níquel en nogal pecanero y análisis de la correlación nutrimental que presenta con otros elementos para incrementar el área foliar y el rendimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

El presente proyecto se llevó a cabo en la pequeña propiedad “Tierra Blanca”, en el municipio de Matamoros, Coahuila, localizado en las coordenadas 25° 20' 28" N y 102° 48' 16" O. En un suelo de textura limo-arcillosa, con un pH de 7.4, contenido de materia orgánica de 2.4%.

Manejo de la Huerta

Se utilizaron arboles de 63 años de edad, de la variedad “Squirrel Delight”. La huerta esta plantada en un sistema de marco real a 14 por 14 m, con una densidad de 50 árboles por hectárea. El riego de la huerta es por goteo mediante cintilla enterrada a 40 cm; la lámina total es de 120 cm al año, aplicada desde el 1 de marzo hasta el 15 de octubre. Se realizó una

fertilización semanal de N al suelo, con una dosis de 31 kg ha⁻¹ de urea, de abril a julio. Se realizaron cinco aplicaciones de nutrientes al follaje, enfocados a abastecer de Zn a los árboles, con una solución que contenía 3 kg de sulfato de Zn, 1 kg de sulfato de Mn y 5 kg de urea libre de Biuret en 1000 L ha⁻¹ de agua, dichas aplicaciones son las que se manejan cada año en esta huerta. Se aplicaron insecticidas para el control del barrenador de la nuez (*Acrobasis nuxvorella*), barrenador de nuezno (*Cydia caryana*) y pulgón amarillo (*Melanaphis sacchari*).

Tratamientos

Se seleccionaron 25 árboles de la parte media de la huerta, todos con síntomas visibles de deficiencia de Ni. Los tratamientos consistieron en un testigo y cuatro dosis de Ni, aplicados en tres fechas sobre los mismos árboles. Se utilizó un diseño en bloques al azar, con cinco repeticiones, siendo un árbol la unidad experimental. Los tratamientos consistieron en la aplicación foliar del fertilizante comercial Speedfol Pecano SP^Ò (SQM), en concentraciones de 100,150, 200 y 250 mg L⁻¹ y un testigo sin aplicación. El fertilizante comercial de Ni, presenta la siguiente composición: N 5% P₂O₅ 2%, K₂O 18%, MgO 4.2% y NiO 5.4%. Las fechas de aplicación fueron: 1) 20 de abril, antes de la floración (AF), 2) 9 de mayo, en el crecimiento de frutos (CF), y 3) 24 de junio durante el estado acuoso de la nuez (EAN). Las aspersiones se realizaron con una maquina aspersora marca UNIGREEN AIRDROPT20C. CARBO 153.MOV y se realizaron en el transcurso de la mañana (8 a 10 AM); en cada aspersión se cubrió completamente el follaje hasta el punto de rocío. En todas las formulaciones, se añadió 0.1% de urea como ion transportador y 0.02% de Tween 20 como agente tensioactivo, el pH de las soluciones asperjadas fue ajustado con ácido sulfúrico entre 6-6.5.

Muestreo y Análisis Foliar

El análisis foliar es una técnica utilizada para relacionar la concentración de los nutrimentos en el tejido foliar y rendimiento o desarrollo de la planta. Se realizaron tres muestreos foliares para evaluar el efecto de los tratamientos, los cuales se llevaron a cabo 15 días después de cada fecha de aplicación de tratamientos. Los muestreos se realizaron en los cuatro puntos cardinales de la parte media del árbol y se tomó el tercer par de foliolos de los brotes seleccionados; para cada

muestra se tomaron alrededor de 80 folíolos por árbol. Las hojas obtenidas en los diferentes muestreos se utilizaron para determinar el verdor de la hoja, área foliar y concentraciones foliares de N, Ca, Zn, Mn, Ni, Cu. Las muestras colectadas fueron analizadas en el Laboratorio de análisis de Suelo, Agua y Planta del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Matamoros, Coahuila. Las hojas fueron lavadas con agua corriente, posteriormente con agua desionizada, dejándolas a secar a temperatura ambiente, posteriormente fueron introducidas a una estufa de circulación forzada de aire a 60 °C hasta seco constante y se molieron utilizando un tamiz malla. En estas muestras se determinó la concentración de Ca, Zn, Mn, Ni, y Cu mediante espectroscopía de absorción atómica, N por el método Kjeldahl y P por espectroscopía UV-Vis (Jones, 2017). El área foliar fue determinado, después de la última aplicación de los tratamientos. La medición se realizó en una muestra de 25 hojas por árbol y se utilizó un medidor de área foliar portátil (Li-Cor 3000).

Rendimiento de Nuez y Porcentaje de Almendra

Se evaluó la producción de nuez por árbol. Una muestra de 30 nueces por repetición se secó en estufa de aire forzado a 65 °C hasta peso constante, luego se pesaron en seco, se descascararon y se pesó por separado la almendra para obtener el porcentaje de almendra (Wood, 2002).

Análisis Estadístico

Para cumplir con los supuestos de normalidad, los datos de la variable porcentaje de almendra se transformaron mediante arcoseno y posteriormente resultados obtenidos incluido esta variable fueron sometidos a un análisis de varianza para determinar la diferencia entre tratamientos y donde se detectó diferencia significativa (SAS, 2009), se utilizó la prueba de la diferencia mínima significativa de Fisher con un nivel de significación de 5% ($\alpha = 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Existe una correlación entre las dosis de níquel con la concentración de nitrógeno en la etapa

fenológica “antes de la floración”, ya que al aumentar la dosis de níquel la concentración de nitrógeno disminuye, y esto se debe a que en hojas con deficiencia de níquel el área foliar es más pequeña, por lo tanto el nitrógeno se encuentra concentrado en una superficie menor y conforme se incrementa la dosis de níquel el área foliar aumenta (Figura 1a); y por lo tanto el nitrógeno disminuye (Wood *et al.*, 2004). En la etapa de crecimiento de frutos (Figura 1b) se presenta la misma correlación, conforme el níquel aumenta, el nitrógeno disminuye dando un valor de R^2 de 0.7335. En etapa de estado acuoso de la nuez ya no existe ninguna correlación, esto es debido a que el crecimiento de las hojas llegó a su término y comienza el llenado de la almendra (Frusso, 2007).

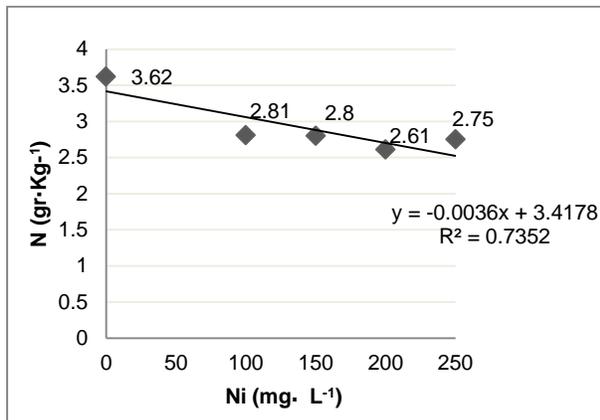


Figura 1a. Correlación de nitrógeno con dosis de níquel en etapa antes de floración

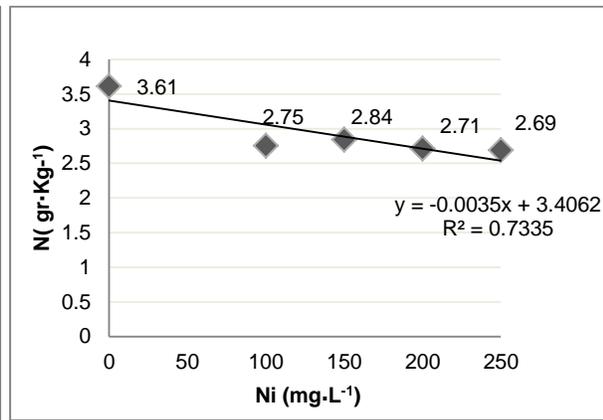


Figura 1b. Correlación de nitrógeno con dosis de níquel en etapa de crecimiento de frutos

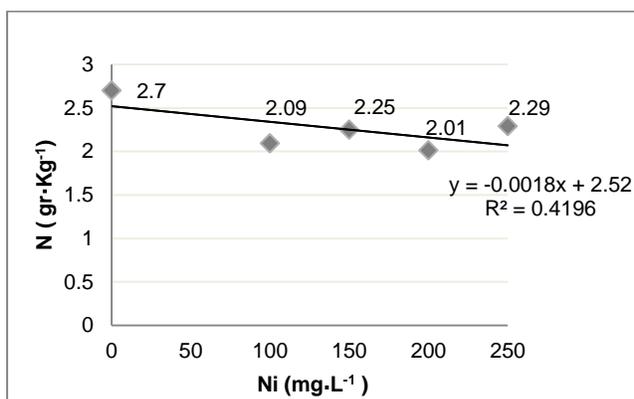


Figura 1c. Correlación de nitrógeno con dosis de níquel en etapa estado acuoso de la nuez

Para Calcio existe una mayor correlación de este elemento con el níquel, dando un valor de $R^2=0.8489$ en etapa de floración (Figura 2a) e incrementando el valor de $R^2= 0.9208$ en la etapa de crecimiento de frutos y disminuye un poco en la etapa estado acuoso de la nuez con un valor

de $R^2 = 0.6763$ (Figura 2c), observando que durante las tres etapas fenológicas del nogal conforme aumenta la concentración de níquel en las hojas el calcio también incrementa su concentración, debido a que existe un antagonismo directo entre Ni y Mn en el cual, la presencia de Ni disminuye las concentraciones de Mn y éste a su vez aumenta las concentraciones de Ca (Medina et al., 1999).

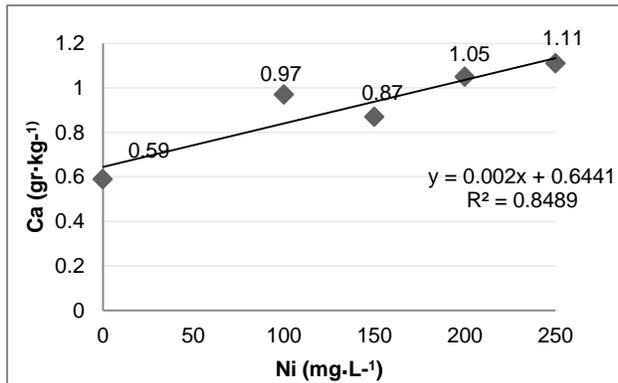


Figura 2a. Correlación de calcio con dosis de níquel en etapa antes de floración

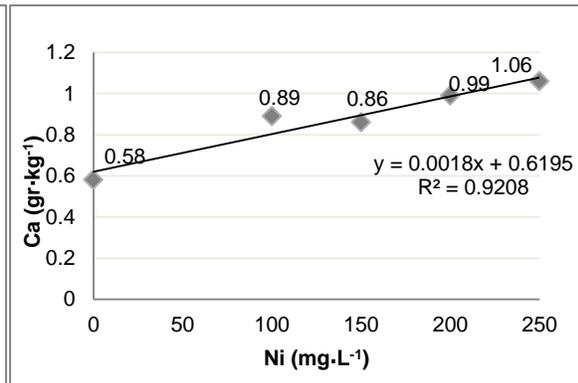


Figura 2b. Correlación de calcio con dosis de níquel en etapa de crecimiento de frutos

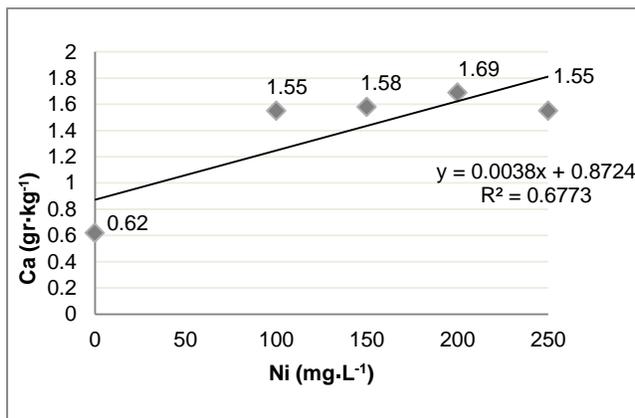


Figura 2c. Correlación de calcio con dosis de níquel en etapa estado acuoso de la nuez

En la Figura 3a y Figura 3b se observa que no existe correlación entre níquel y concentraciones de Zn, más sin embargo en la etapa de crecimiento de frutos (Figura 3c), se muestra que conforme aumentan las dosis de níquel la concentración de Zn disminuye, obteniendo un valor de $R^2 = 0.8384$ debido a que el Zn en esta etapa es crítico para brotación, formación de dosel y formación de frutos de nuez (Wood et al., 2004).

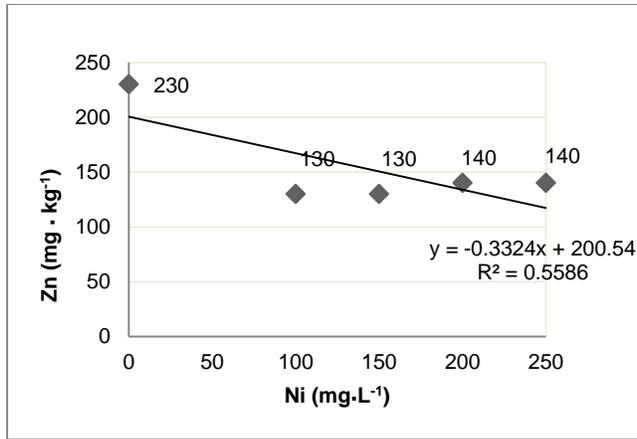


Figura 3a. Correlación de zinc con dosis de níquel en etapa antes de floración

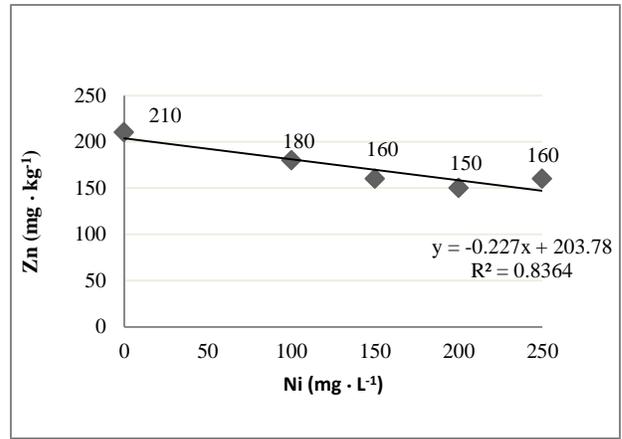


Figura 3b. Correlación de Zinc con dosis de níquel en etapa de crecimiento de frutos

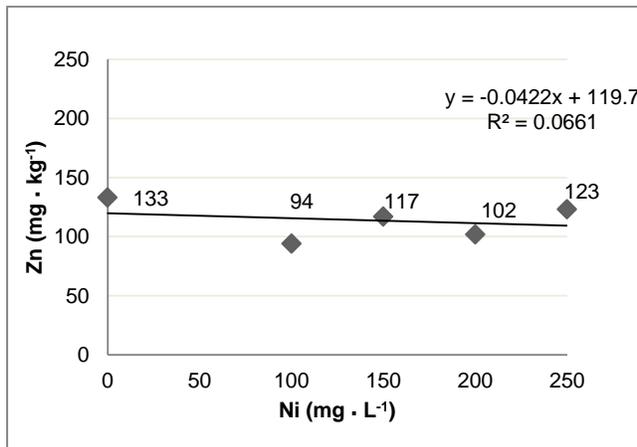


Figura 3c. Correlación de zinc con dosis de níquel en etapa estado acuoso de la nuez

En la etapa de floración para el elemento de Mn (Figura 4a), no se presenta ninguna correlación con las dosis de Ni, más sin embargo en la etapa de crecimiento de fruto en la Figura 4b se observa un aumento en las concentraciones de Mn que van desde 57 hasta 173 mg·kg⁻¹ y van disminuyendo conforme aumenta la dosis de Ni obteniendo un valor de $R^2 = 0.7847$ y a pesar de que las concentraciones de Mn disminuyen en la etapa de estado acuoso de la nuez (Figura 4c), con valores que van desde 31 a 56 mg·kg⁻¹, sigue existiendo una correlación con las dosis de Ni donde la tendencia es que con aumento de dosis de Ni disminuye el Mn dando un valor de $R^2 = 0.7356$. Diversos estudios demuestran que el Cu, Mn y Zn están estrechamente relacionados, debido a que concentraciones elevadas de estos micronutrientes inhiben la absorción de Ni o viceversa debido a la competencia entre estos cationes divalentes por los sitios de absorción en

raíces y hojas, por lo cual no es recomendable hacer aplicaciones foliares de estos micronutrientes con el Ni (Wagle et al., 2011).

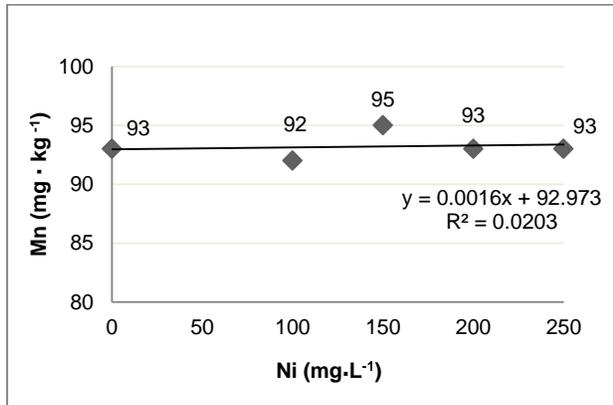


Figura 4a. Correlación de manganeso con dosis de níquel en etapa antes de floración

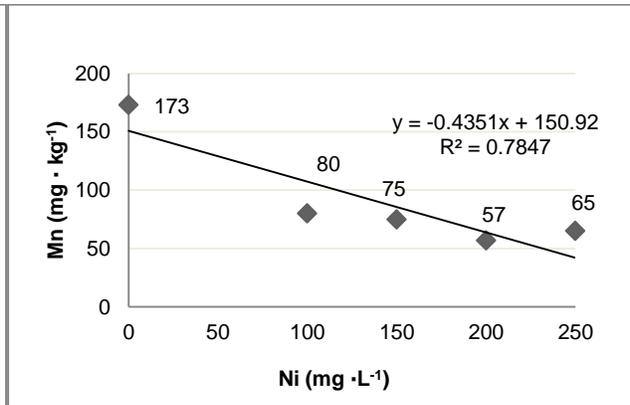


Figura 4b. Correlación de manganeso con dosis de níquel en etapa de crecimiento de frutos

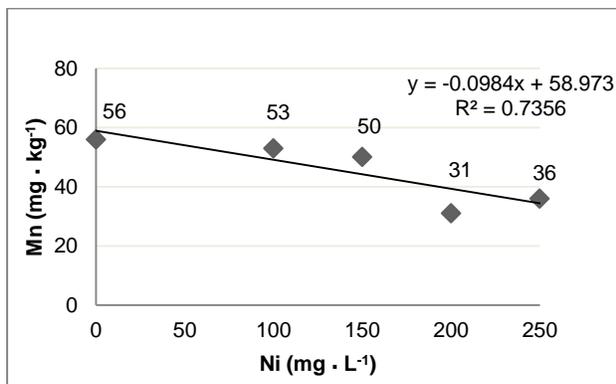


Figura 4c. Correlación de manganeso con dosis de níquel en etapa estado acuoso de la nuez

En la etapa antes de la floración para el elemento de Cu (Figura 5a) y en la etapa de crecimiento de fruto (Figura 5b) no se observó correlación entre las concentraciones de Cu con el incremento de las dosis de Ni, pero en la etapa de estado acuoso de la nuez se observa una disminución de Cu que va de 21 hasta 9 mg·kg⁻¹ conforme aumentan las dosis de Ni. Obteniendo un valor de R²= 0.8025, se debe considerar la concentración de este elemento, debido a que su presencia, disminuye la concentración del Ni y viceversa (Wagle et al., 2011).

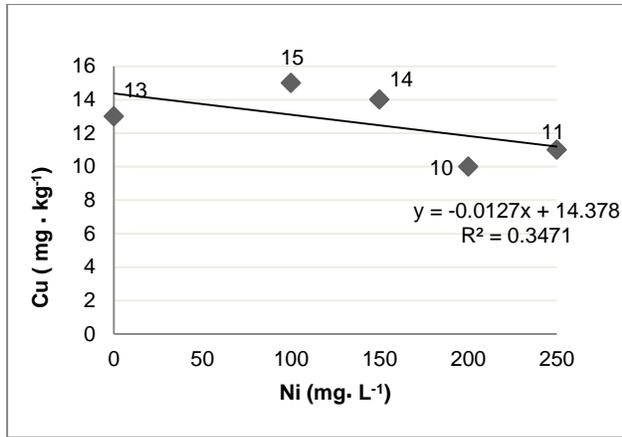


Figura 5a. Correlación de cobre con dosis de níquel en etapa antes de floración

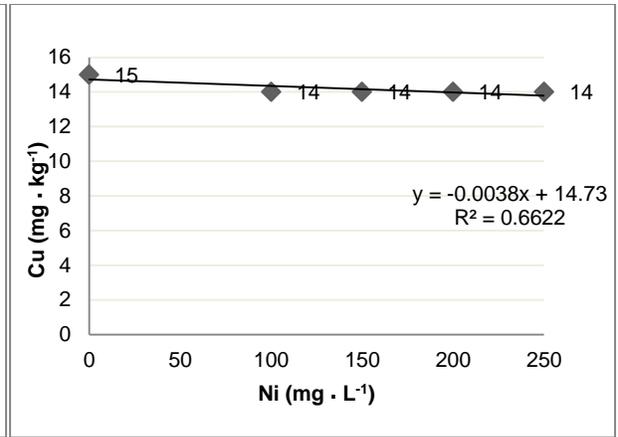


Figura 5b. Correlación de cobre con dosis de níquel en etapa de crecimiento de frutos

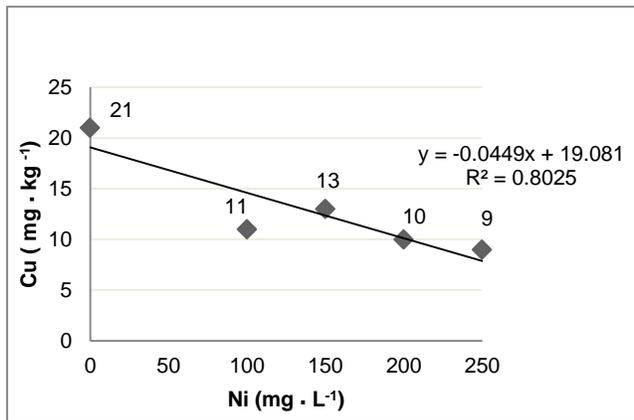


Figura 5c. Correlación de cobre con dosis de níquel en etapa estado acuoso de la nuez

En la Figura 6 se puede observar que existe correlación entre área foliar y dosis de Ni, obteniendo un valor de 171 cm² en hojas con deficiencia de Ni con dosis nula y se incrementa conforme aumentamos las dosis, alcanzando el área foliar máxima con 321.29 cm² en dosis de 150 mg·L⁻¹ y obteniendo una correlación de R²= 0.69. Ruter (2005), logró incrementos significativos en el área foliar con aplicaciones de sulfato de níquel. Wood et al. (2003) indica que la aplicación foliar de níquel corrige satisfactoriamente la sintomatología de la oreja del ratón en árboles de nogal; ya que este elemento es necesario para la actividad de la enzima ureasa y en su ausencia se produce una necrosis marginal, debido una alta acumulación de urea a lo largo de los márgenes del follaje (Eskew et al., 1983; Krogmeier et al., 1989). López (2012) señala que la

aplicación de níquel al cultivo de arveja incrementa significativamente el área foliar y afecta positivamente la metabolización de la urea (Bonilla, 2000; Epstein y Bloom, 2005), lo que favorece la conversión del N-ureico a N-orgánico o aminoácidos

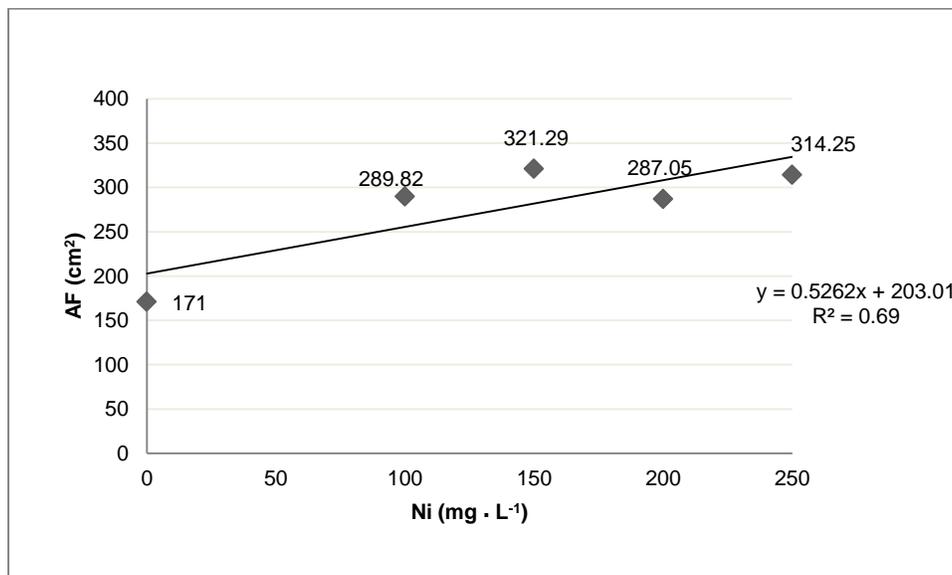


Figura 6. Correlación de área foliar (AF) con aplicaciones de níquel en nogal pecanero

La aplicación de Ni en las concentraciones evaluadas afectó el rendimiento, no así el peso de nuez o el porcentaje de almendra con respecto al testigo (Cuadro 1). El rendimiento de la huerta en general fue bajo, de 11 a 27 kg árbol⁻¹, debido a que ese año fue de baja producción (alternancia). Se obtuvo el mayor rendimiento con la dosis de 100 mg L⁻¹ con 1.3 Mg ha⁻¹, lo cual se encuentra por debajo de la media nacional que es de 1.76 Mg ha⁻¹ de las variedades Western y Wichita (SIAP, 2009). En el peso por nuez y porcentaje de almendra existió menos variación, con valores de 6 a 6.3 g nuez⁻¹ y de 45.1 a 49.2% de almendra; los valores anteriores son menores al promedio de las variedades Western y Wichita, que son las de mayor presencia en las zonas productoras del norte del país (Orona et al., 2013) debido entre otras características a que presentan una mayor concentración de compuesto bioactivos en la almendra (Flores et al., 2017), con más de 7 y 9 g nuez⁻¹, respectivamente y más de 55% de almendra (Ojeda et al., 2016)

Cuadro 1. Efecto de la aspersión foliar con níquel (Ni) sobre el rendimiento, peso de nuez y almendra de nuez.

| Níquel | Rendimiento | Peso de una Nuez | Porcentaje de Almendra |
|---------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| mg/L | kg.árbol ⁻¹ | g | % |
| 0 | 15.9ab* | 5.96a | 48.4a |
| 100 | 26.8a | 6.16a | 47.4a |
| 150 | 15.83ab | 6.33a | 45.1a |
| 200 | 16.9ab | 6.29a | 49.2a |
| 250 | 11.0b | 6.12a | 44.8a |

* Promedios con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes, según la prueba de Fisher ($P \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

Existe una correlación directa de níquel con los siguientes elementos Nitrógeno, Calcio, Zinc, Manganeso y Cobre, sobre todo en la etapa de crecimiento de fruto del nogal. Nitrógeno, Manganeso, Cobre y Zinc disminuyen su concentración foliar al aumentar la dosis de Ni, para calcio conforme aumentan la dosis de níquel, también se incrementa.

La aspersión foliar de níquel incrementa el área foliar, de esta manera contribuye a la corrección de la sintomatología conocida como “Oreja de ratón” en hojas de nogal e incrementa las concentraciones adecuadas.

Bajo las condiciones de este trabajo se recomienda utilizar la dosis de 100 mg L⁻¹, la cual registra mayor rendimiento, corrige la deficiencia de este elemento e incrementa el área foliar

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por los conocimientos brindados. Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental La Laguna por el uso de sus laboratorios y a al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por el apoyo brindado.

LITERATURA CITADA

Bai, C., C. C. Reilly, and B. W. Wood. 2007. Nickel deficiency affects nitrogenous forms and urease activity in spring xylem sap of pecan. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*132: 302-309. doi: <https://doi.org/10.21273/JASHS.132.3.302>.

Bai, C., C. C. Reilly, and B. W. Wood. 2006. Nickel deficiency disrupts metabolism of ureides, amino acids, and organic acids of young pecan foliage. *Plant Physiol.* 140: 433-443.

Bonilla, I. 2000. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. pp. 83-97. In: J. Azcón B. y M. Talón (eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Mc Graw Hill Interamericana. Barcelona, España.

Brown, P. H. 2006. Ni. In: Borker, A. V. and D. J. Pilbeam (eds.). *Handbook of plant nutrition*. CRC. Press, Boca Raton, FL. pp: 329-350.

Epstein, E. and A. J. Bloom. 2005. *Mineral nutrition of plant: Principles and perspectives*. Sinauer Associates. Sunderland, MA, USA. ISBN: 9780878931729.

Eskew, D. L., R. M. Welch, and E. E. Cary. 1983. Nickel: An essential micronutrient for legumes and possibly all higher plants. *Science* 222: 621-623. doi: <https://doi.org/10.1126/science.222.4624.621>

Figueroa V U, Lombardini L y Medina M C. 2006. Alternativas en la fertilización del nogal pecanero. XIV Simposium Internacional Nogalero. Torreón Coahuila. México.

Flores-Cordova, M., E. Sánchez, E. Muñoz-Márquez, D. L. Ojeda-Barrios, J. M. Soto-Parra, and P. Preciado-Rangel. 2017. Phytochemical composition and antioxidant capacity in Mexican pecan nut. *Emir. J. Food Agric.* 29: 346-350. doi: <https://doi.org/10.9755/ejfa.EJFA-2016-08-1075>.

Frusso, E. A. (2007). Características morfológicas y fenológicas del pecan, guía fenológica ampliada y resumida. Jornada Técnica Proyecto Propecan (2a., 2007, Buenos Aires). Memorias. Bueno Aires, INTA Delta del Paraná.

Jones, J. B. 2017. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. CRC press. Boca Raton, FL, USA. ISBN-13: 978-1138424388.

Krogmeier, M. J., G. W. McCarty, and J. M. Bremner. 1989. Phytotoxicity of foliar-applied urea. Proc. Natl. Acad. Sci. 86: 8189-8191. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.86.21.8189>

López Murcia, M. Á. 2012. Respuesta del cultivo de arveja (*Pisum sativum* L.) a la application de níquel. Rev. UDCA Act. Divul. Cient. 15: 357-362. doi: <https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n2.2012.835>

Medina-Morales, M. C., E. J. Moreno, J. H. Aguilar Pérez y S. J. García Garza. 1999. Aspersiones foliares de manganeso y cobre en nogal pecanero. Terra 17: 317-323

Ojeda-Barrios, D. L., O. A. Hernández-Rodríguez, J. MartínezTéllez, A. Núñez-Barrios y E. Perea-Portillo. 2009. Aplicación foliar de quelatos de zinc en nogal pecanero. Rev. Chapingo. Ser. Hortic. 15: 205-210

Ojeda-Barrios, D., E. Sánchez-Chávez, J. P. Sida-Arreola, R. Valdez-Cepeda, and M. Balandran-Valladares. 2016. The impact of foliar nickel fertilization on urease activity in pecan trees. J. Soil Sci. Plant Nutr. 16: 237-247. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162016005000019>.

Orona-Castillo, I., D. M. Sangerman-Jarquín, M. Fortis Hernández, C. Vázquez Vázquez y M. Á. Gallegos Robles. 2013. Producción y comercialización de nuez pecanera (*Carya illinoensis* Koch) en el norte de Coahuila, México. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 4: 461-476

Rodríguez-Jiménez, T. J., D. L. Ojeda-Barrios, F. Blanco-Macías, R. D. Valdez-Cepeda y R. Parra-Quezada. 2016. Ureasa y níquel en la fisiología de las plantas. Rev. Chapingo. Ser. Hortic. 22: 69-82. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2014.11.051>

Ruiz-Argueso, T., J. Imperial, and J. M. Palacios. 2000. Uptake hydrogenases in root nodule bacteria. In: Triplett, E. W. (ed.). Prokaryotic nitrogen fixation: a model system for analysis of a biological process. Horizon Scientific Press, Wymondham, U. K. pp: 489-507

Ruter, J. M. 2005. Effect of nickel applications for the control of mouse ear disorder on river birch. J. Environ. Hortic. 23: 17- 20. doi: <https://doi.org/10.24266/0738-2898-23.1.17>

SAS Institute. 2009. SAS/SAT user's guide. Version 9.2. SAS Institute. Cary, NC, USA.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2009. Anuario estadístico de la producción agrícola. http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp (Consulta: febrero 09, 2018)

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2016. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Altas Agroalimentario 2016. Recuperado el día 19 de marzo del 2022 de https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016.

Wagle, P., M. W. Smith, B. W. Wood, and C. T. Rohla. 2011. Response of young bearing pecan trees to spring foliar nickel applications. J. Plant Nutr. 34: 1558-1566. doi: <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.585210>.

Wood, B. W., C. C. Reilly, and A. P. Nyczepir. 2004. Mouse-ear of pecan: A nickel deficiency. HortScience 39: 1238-1242. doi: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.39.6.1238>.

Wood, B. W., C. C. Reilly, and A. Nyczepir. 2003. Nickel corrects mouse-ear. Pecan Grower 15: 3-8

Wood, B. W. 2002. Late nitrogen fertilization in pecan orchards. A review. pp. 47-59. In: A review. Proceedings 36th. Western pecan conference. Las Cruces, NM, USA

V. CONCLUSIONES GENERALES

El níquel es un elemento que basa su importancia en la hidrólisis de la enzima ureasa, y a pesar de que su presencia en suelo y planta son requeridas en concentraciones relativamente pequeñas ($0,001 \text{ mg kg}^{-1}$) comparadas con otros elementos.

La ausencia de éste ocasiona daños significativos en los cultivos y afecta su rendimiento debido a la falta de generación de amonio y amoniaco que son los productos de la descomposición de la ureasa. Si no se cuenta con la presencia de níquel la enzima ureasa no se activa y la urea incrementa su concentración causando daños visibles en las puntas de las hojas.

Hasta el momento su función como cofactor de la ureasa es el único aspecto relevante que se le ha atribuido a este metal, y desde el 2003 fue considerado como elemento esencial para las plantas debido a que es insustituible por otro elemento en el proceso de la descomposición de la urea.

Las aspersiones foliares de níquel al nogal pecanero corrigen la sintomatología conocida como “Oreja de ratón”, generando un incremento en el área foliar.

Se recomienda utilizar la dosis de 100 mg L^{-1} , la cual registra mayor rendimiento, corrige la deficiencia de este elemento e incrementa el área foliar