

Cobre y Níquel, microelementos esenciales en la nutrición vegetal

VILLEGAS-TORRES, Oscar Gabriel*†, DOMÍNGUEZ-PATIÑO, Martha Lilia, MARTÍNEZ-JAIMES, Patricia y AGUILAR-CORTES, Miguel

Universidad de Guanajuato, Campus Celaya-Salvatierra, Celaya, C.P. 38060, Campus Irapuato-Salamca, Irapuato, Gto.

Recibido 2 de Enero, 2015; Aceptado 26 de Marzo, 2015

Resumen

En la Tierra existe un centenar de elementos químicos naturales, pero los seres vivos que la habitan usan tan solo una veintena. Conforman este grupo numerosos metales, muchos de ellos esenciales para que los organismos puedan completar su ciclo de vida. Sin embargo, mientras algunos son imprescindibles para la supervivencia, el exceso o la presencia de otros pueden resultar tóxicos o aun letales. Las plantas han desarrollado mecanismos específicos para absorber y acumular nutrientes, no obstante, algunos metales y metaloides son absorbidos y acumulados en la planta debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos requeridos. La absorción del cobre y níquel por las plantas es el primer paso de entrada en la cadena alimentaria, de carácter metabólico debido a la capacidad de acumular metales en sus tejidos. El objetivo del ensayo fue conocer los resultados de investigaciones recientes encaminadas a dilucidar la función del cobre y níquel en la nutrición de las plantas.

Nutrición vegetal, Cobre, Níquel

Abstract

On Earth there a hundred natural chemical elements, but living beings that inhabit used only twenty. Numerous metals make up this group, many of them essential for agencies to complete their life cycle. However, while some are essential for survival, excess or the presence of others can be toxic or even lethal. The plants have developed specific mechanisms absorb and accumulate nutrients, however, some metals and metalloids are absorbed and accumulated in the plant because they exhibit an electrochemical behavior similar to the required nutrients. Absorption of Copper and Nickel by plants is the first step of entering the food chain, metabolic character due to the ability to accumulate metals in their tissues. The test objective was to know the results of recent research to elucidate the function of copper and nickel in plant nutrition.

Plant nutrition, Copper, Nickel

Citación: VILLEGAS-TORRES, Oscar Gabriel, DOMÍNGUEZ-PATIÑO, Martha Lilia, MARTÍNEZ-JAIMES, Patricia y AGUILAR-CORTES, Miguel. Cobre y Níquel, microelementos esenciales en la nutrición vegetal. Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias 2015, 2-2:285-295

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: voscar66@yahoo.com.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La concentración de cobre en la corteza terrestre es de 20-30 mg kg⁻¹, pero en algunos suelos de diferentes partes del mundo se eleva a más de 50 mg kg⁻¹, debido a la actividad minera, la industria petrolera, el uso de aguas residuales sin tratamiento para el riego de suelos agrícolas y al uso de fungicidas en la agricultura (León y Sepúlveda, 2012).

El cobre es un metal esencial para el crecimiento y desarrollo normal de las plantas. El contenido en sus tejidos es de 10 µg⁻¹, este elemento participa en los procesos bioquímicos tales como la fotosíntesis, respiración, respuesta al estrés oxidativo, metabolismo de la pared celular y señalización de hormonas, cofactor de varias enzimas como la superóxido dismutasa, citocromo oxidasa, amino oxidasa, lacasa, plastocianina y polifenol oxidasa, además juega un papel esencial de señalización de transcripción y tráfico de proteínas (Yruela, 2005).

El níquel es el vigésimo segundo elemento más abundante en la corteza terrestre, se encuentra en las rocas ígneas como metal libre o junto con el hierro (Chen et al., 2009). El níquel es considerado un micronutriente esencial para las plantas ya que es un constituyente de la ureasa, una metal enzima empleada en la hidrólisis de la urea y pequeñas cantidades de este elemento (0.01 a 5 µg g⁻¹ peso seco) son esenciales para las plantas (Seregin y Kozhevnikova, 2006). Además, el metabolismo del níquel es decisivo para el mantenimiento celular redox, para las actividades de ciertas enzimas y otras respuestas bioquímicas, fisiológicas y de crecimiento de las plantas (Yusuf et al., 2011). Sin embargo, el impacto de la toxicidad de níquel sobre la fisiología de las plantas tiene efectos negativos en la salud humana y la agricultura (Ma et al., 2009).

El cobre

El cobre es absorbido por las plantas como ion divalente en suelos aereados y como ion monovalente en suelos húmedos con bajas concentraciones de oxígeno. La absorción de iones comienza en la epidermis de la raíz y el movimiento de la epidermis a la endodermis es por difusión apoplástica y la translocación de cobre de la raíz a las hojas, a través del xilema, esto se lleva a cabo de forma pasiva por la corriente de la transpiración (León y Sepúlveda, 2012).

El transporte de cobre a través de la membrana plasmática es por medio de canales o transportadores que es la única vía para pasar a través de la endodermis y llegar al tejido vascular; al respecto se han identificado una familia de proteínas transportadoras llamadas COPT (Copper transporters), se ha identificado seis miembros de esta familia COPT1-6 en *Arabidopsis thaliana* (Jun et al., 2012).

Toxicidad de cobre en las plantas

Los niveles tóxicos de cobre ocurren naturalmente en algunos suelos que contienen altos niveles de este elemento como resultado de la actividad antropogénica en el ambiente. Se conoce que los metales de transición como el cobre catalizan la formación de radicales hidroxilo, de hecho el exceso de cobre causa estrés oxidativo en las plantas y consecuentemente incrementa la respuesta de antioxidantes debido al incremento de la producción de radicales libres de oxígeno altamente tóxicos (Yruela, 2005).

En un estudio con niveles altos de cobre (2.0-4.0 mmol kg⁻¹) en el suelo disminuyó considerablemente la biomasa de planta de amaranto causó efectos graves sobre el crecimiento.

El contenido de pigmentos fotosintéticos y elementos minerales como el Fe, K y Mg disminuyeron en las hojas de las plantas. Además el contenido de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) y las actividades de las enzimas superóxido dismutasa (SOD) y la guayacol per oxidasa (GPOD) así como la per oxidación lipídica y la fuga de electrolitos aumentaron pero la catalasa (CAT) y la ascorbato peroxidasa (APX) disminuyeron (Shi-Sheng, 2007).

En un estudio evaluaron el efecto del cobre sobre la crecimiento y la fotosíntesis en plantas de pepino (*Cucumis sativus*). En el tratamiento con la dosis más alta (10 µg) se observó disminución en el área foliar en hojas jóvenes mientras que en las hojas viejas se observó disminución en la fotosíntesis. La sacarosa y el contenido de almidón aumentaron en ambos tipos de hoja. La tasa de crecimiento y la superficie de área foliar de las plantas estresadas con la aplicación alta de cobre estuvieron significativamente por debajo del control. Los autores concluyen que la respuesta de las hojas de pepino (*Cucumis sativus*) al stress inducido por el cobre depende del estado de crecimiento de la planta y que la inhibición de la fotosíntesis en las hojas maduras estresadas con cobre pudo ser causada por otro factor (Vinit-Dunant et al., 2002). Se sugiere que la reducción en el contenido de clorofila en las hojas de plantas con alta concentración de cobre se debe a que hay mayor susceptibilidad a la foto inhibición como consecuencia de una deficiencia de hierro inducida por el cobre (Yruela, 2005).

En China se investigaron los efectos de diferentes concentraciones de cobre añadido a los suelos sobre el crecimiento del maíz y la acumulación de este metal en las partes aéreas de las plantas de maíz en condiciones de campo.

Los resultados mostraron que la biomasa de la paja y los granos disminuyó a medida que aumentaron las concentraciones de cobre, además se observaron síntomas de toxicidad visibles, retardo en el crecimiento, clorosis y reducción en el peso seco de granos, respecto a la acumulación del metal en las partes aéreas de las plantas. Las concentraciones de cobre en la planta ocurrieron en el orden siguiente: hojas>tallos>granos. Los resultados también mostraron que las cantidades de cobre en la solución son predictores de toxicidad y las concentraciones críticas de cobre en plantas de maíz fueron dependientes de tipo de suelo (Guo et al., 2010).

Se evaluó la influencia de una alta concentración de sulfato de cobre sobre el crecimiento, acumulación de cobre, per oxidación lipídica, contenido de compuestos fenólicos totales en las raíces de dos cultivares de lenteja. Las plantas fueron sometidas a 0.5 mM de cobre de 3 a 5 días en oscuridad total. Los resultados mostraron que la alta concentración de cobre causó inhibición en el crecimiento en los dos cultivares de lenteja. Este metal induce daño oxidativo y en un cultivar se produjo disminución de compuestos fenólicos e incremento en la peroxidación lipídica, lo cual puede indicar que el nivel del estrés oxidativo generado por la presencia de la excesiva concentración de cobre fue más alto que la capacidad del sistema antioxidativo (Janas et al., 2009)

Los mecanismos desarrollados en la adquisición de los metales pesados como micronutrientes esenciales no han sido claramente definidos; no obstante, un gran número de genes han sido identificados, los cuales codifican para transportadores potenciales.

Se ha observado que el exceso de cobre activa la proteína mitogénica quinasa y se sugiere que esta proteína participa en la señalización de la transducción inducida por metales pesados y en la fosforilación de proteínas (Yruela, 2005). Se ha estudiado la participación de la quinasa en la señalización y su relación con el estado redox celular en raíces y hojas de plantas de *Arabidopsis thaliana* sometidas a estrés por metales y se ha concluido que la quinasa juega un importante papel en la señalización celular durante la toxicidad inducida por cobre en las raíces de *Arabidopsis thaliana* (Smeets et al., 2013).

La hormona vegetal etileno es un importante señalizador en situaciones de estrés abiótico pero también en interacciones de planta-patógeno (Yruela, 2005). En plantas de chile estresadas con cobre mostraron menos síntomas después de la inoculación con *Verticillium dahliae* y se evaluó si tal protección se acompañó de una respuesta de defensa inducida por estrés por cobre evaluando la actividad de la per oxidasa y quinasa. En los resultados, la actividad de la per oxidasa pero no la de la quinasa se incrementó en las raíces, tallos y hojas de las plantas estresadas. En conclusión, el cobre induce una reacción de defensa frente a los metales pesados y también contra patógeno que atacan a la planta y dicha respuesta podría ser regulada por hormonas vegetales como el etileno. Sin embargo, se necesitan más investigaciones para desentrañar esta regulación (Chmielowska et al., 2010).

Mecanismos de protección al cobre

El éxito de la fitoextracción depende de varios factores como la disponibilidad del metal para su absorción por la raíz (biodisponibilidad) y la capacidad de la planta para absorber, transportar y acumular los metales en los brotes.

La biodisponibilidad es altamente modulada por microorganismos catalizando las reacciones redox y movilizándolo los metales en el suelo para su absorción por las raíces, además las plantas exudan ácidos orgánicos y otros componentes que pueden quelatar los metales o servir como nutrientes para los microorganismos y esto indirectamente afecta las propiedades del suelo y la movilidad del metal (Ducic et al., 2005).

Existen mecanismos externos de protección al cobre en las plantas como es la interacción de las raíces con hongos micorrízicos. Dos clones de plantas de álamo inoculadas con micorrizas arbusculares se cultivaron en suelos contaminados con cobre y sin cobre. Se evaluaron los efectos de este metal en el crecimiento de las plantas así como el papel que tienen los hongos micorrízicos para aliviar el estrés. Se determinó el contenido de poliamida (un metabolito secundario en la defensa antioxidante al estrés), del cobre y del fósforo, además de varios parámetros morfológicos y la colonización microfísica. Los dos clones mostraron diferencias en relación con la contaminación del cobre y la simbiosis con micorrizas, lo que confirma la precisa selección de plantas para fines de fitorremediación, además la gran acumulación de cobre en las raíces de álamo sugiere que la estrategia de fitoestabilización es adecuada para suelos contaminados con cobre (Todeschini et al., 2007).

El níquel

El níquel es considerado como un micronutriente esencial ya que las plantas no pueden completar su ciclo de vida en ausencia de éste y no puede ser sustituido por otro elemento, sin embargo, su concentración en la mayoría de las plantas es muy bajo, de 0.5-10 mg kg⁻¹ de peso seco (Chen et al., 2009).

El níquel ha sido identificado como componente de un número de enzimas incluyendo glioxalinas (familia I), metil-CoM reductasas, ureasas y unas pocas superóxido dismutasas. Además, el níquel juega un papel importante en los procesos metabólicos incluyendo la ureolisis, metabolismo del hidrógeno, biogénesis del metano y la citogénesis (Chen et al., 2009). El níquel es un importante componente de varias enzimas como la ureasa, responsable de la hidrólisis de la urea. El amonio liberado por ésta hidrólisis participa en varios procesos anabólicos, particularmente en la síntesis de la glutamina, una reacción crucial para asimilación del amonio (Seregin y Kozhevnikova, 2006). Una serie de experimentos con varias plantas han demostrado que el níquel y la ureasa son esenciales para las funciones vitales de las plantas y la deficiencia del contenido de níquel y la baja actividad de la ureasa dan como resultado un desorden en el metabolismo del nitrógeno y la acumulación a un nivel tóxico de urea en los brotes causando con esto síntomas que se manifiestan como necrosis en las puntas de las hojas jóvenes o clorosis en hojas viejas (Yusuf et al., 2011).

En algunas leguminosas, pequeñas cantidades de níquel son esenciales para el crecimiento de nódulos en la raíces y para la activación de la hidrogenasa. La eficiencia de la fijación de nitrógeno depende de la actividad de la hidrogenasa porque la oxidación del hidrógeno proporciona ATP necesario para la reducción de N₂ a amoniaco. Además, bajas concentraciones de níquel han mostrado ser promotores en la germinación de semillas de algunas plantas (Seregin y Kozhevnikova, 2006).

Absorción, transporte y distribución de níquel en las plantas

La absorción global del níquel por las plantas depende de la concentración del ion Ni²⁺, del metabolismo de la planta, acidez del suelo o solución, presencia de otros metales y la composición de la materia orgánica. Generalmente, la absorción de níquel disminuye a pH altos. La absorción de níquel en las plantas se realiza principalmente a través de raíces por difusión pasiva y transporte activo (Seregin y Kozhevnikova, 2006). Se plantea la posibilidad de que el níquel compite con otros iones metales esenciales cuando se absorbe por la raíz. En algunos estudios se ha reportado que el níquel se absorbe en las raíces por la vía de absorción de hierro a través de un transportador primario del Fe (AtIRT1) el cual funciona como mediador en la acumulación de níquel en *Arabidopsis thaliana* (Nishida et al., 2011). El calcio disminuye la absorción de níquel en *Arabidopsis bertolonni*, una planta endémica de suelos ricos en metales. En adición a la absorción por raíces, el níquel puede ingresar a las plantas por las hojas (Seregin y Kozhevnikova, 2006).

El níquel es transportado de las raíces a los brotes y hojas a través de la transpiración vía xilema. Este elemento esencial es suministrado a las partes meristemáticas de las plantas por retranslocación de las hojas viejas a las hojas jóvenes y a las yemas, frutos y semillas por la vía del floema. Este transporte está regulado por ligandos y proteínas específicas tales como nicotianamina, histidina y ácidos orgánicos como el ácido cítrico y málico que pueden actuar como quelatores intracelulares (Chen et al., 2009).

Más del 50 % del níquel absorbido por las plantas es retenido en las raíces y, de esta cantidad, cerca del 80 % está presente en el cilindro vascular mientras que menos del 20 % se encuentra en la corteza.

Esta distribución sugiere una alta movilidad de níquel en el xilema y floema. Posteriormente, el níquel es translocado a los tejidos y llega a las partes aéreas de las plantas (Yusuf et al., 2011).

En *Alyssum lesbiacum*, *A. bertolonni* y *Thalpi goesingense* el níquel se ha localizado en las células epidérmicas y en vacuolas. Esta capacidad de acumular níquel en vacuolas determina la tolerancia de las plantas a altos niveles de este elemento en el ambiente (Seregin y Kozhevnikova, 2006).

Se ha estudiado la acumulación y biodisponibilidad de níquel en plantas de trigo en suelos altamente contaminados con metales pesados en China. Los resultados mostraron que la concentración de níquel en las diferentes partes de la planta siguieron la secuencia siguiente: raíces>hojas>vainas>granos. Además reportan que la biodisponibilidad del níquel no solo depende de la concentración de metales pesados en el suelo, sino de sus características, de la relación suelo-planta y otros factores ambientales que afectan el crecimiento (Wang et al., 2009).

Toxicidad de níquel en las plantas

El exceso de concentraciones del níquel es tóxico para la mayoría de las especies de plantas. Los síntomas más comunes de toxicidad de níquel en las plantas son la inhibición del desarrollo, clorosis, necrosis y marchitamientos y se ha atribuido su efecto negativo sobre la fotosíntesis, nutrición mineral, transporte de azúcares y relación con el agua (Gajewska et al., 2006).

Reportes indican que el exceso o deficiencia de níquel afecta la germinación de semillas de algunas plantas (Chen et al., 2009).

Sin embargo, otros autores mencionan que la germinación de semillas es la fase más resistente a los metales pesados (Seregin y Kozhevnikova, 2006).

La inhibición del crecimiento de plantas por níquel resulta de un desorden metabólico general. La exposición de plántulas de trigo a 100 mM causó rápido incremento del contenido de este metal en las hojas. Se detectó la acumulación de níquel en el tejido foliar después de tres días de la aplicación, hubo una disminución en longitud y peso fresco de las hojas después del tratamiento, la reducción en la elongación puede estar asociada con la intensificación del fortalecimiento de lignificación de la pared celular. La disminución del peso fresco puede ser debida a la reducción del contenido de agua inducida por el metal. Además de la restricción del crecimiento, la aplicación de níquel condujo la aparición de clorosis y necrosis en las hojas de trigo y esto indica que este elemento se acumula en las hojas viejas que pueden funcionar como lavadero del metal y así proteger a las hojas más jóvenes del efecto tóxico del níquel (Gajewska et al., 2007).

Otro reportes demuestran que la acumulación del níquel afectan seriamente la producción de las plantas, el total de materia seca, la acumulación en raíces, brotes y la masa total pueden disminuir cuando las plantas son estresadas por níquel (Chen et al., 2009).

La influencia del níquel sobre la fotosíntesis es importante y ocurre en los cloroplastos aislados o en la planta completa. La disminución de la fotosíntesis está relacionada a la disrupción de la estructura de los cloroplastos, el bloqueo de la síntesis de clorofila, desorden en el transporte de electrones, inhibición de las actividades de las enzimas del ciclo de Calvin y por el déficit de CO₂ causado por el cierre estomático (Seregin y Kozhevnikova, 2006).

En plántulas de trigo el exceso de níquel (200 mM) disminuyó el contenido de clorofila y agua (Gajewska et al., 2006).

La sobreproducción de ROS es una respuesta de las plantas a diferentes factores de estrés. Para mantener las funciones metabólicas de la célula bajo condiciones de estrés se requiere de un balance entre la generación y degradación de ROS. Se ha reportado a los metales pesados como inductores de sobreproducción de ROS en los tejidos de las plantas. La toxicidad de níquel en plantas está asociada con el estrés oxidativo y un exceso de este elemento incrementa significativamente la concentración de radicales hidroxilo, aniones superóxido, óxido nítrico y peróxido de hidrógeno (ROS) en los tejidos de las plantas. Se investigaron la influencia de bajas y altas concentraciones de níquel en la actividad de enzimas antioxidativas, superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), guayacol peroxidasa (GPOD) y ascorbato peroxidasa (APX), los resultados mostraron que la exposición de 100 mM en plántulas de trigo condujo a la acumulación de O₂ y H₂O₂ en el tejido de la hoja. El incremento del contenido de estas ROS fue acompañado por la inhibición de las actividades de la CAT y la SOD. El valor más alto de APX en el sexto día coincidió con la disminución del contenido de H₂O₂ lo que sugiere que la APX podría desempeñar un papel importante en la eliminación de estas ROS. Se considera que la función principal de la GPOD en condiciones de estrés es en la participación de a biosíntesis de lignina y consecuentemente en la disminución de la plasticidad de las paredes celulares. Es posible que el aumento en la actividad de GPOD puede ser responsable de la reducción de crecimiento de las hojas de trigo (Gajewska et al., 2007). El glutatión es el mayor antioxidante celular y puede formar complejos con varios metales además de que es el precursor de las fitoquelatinas.

Se ha observado el incremento de glutatión en plantas como *Thalpi* como protección contra el daño oxidativo debido a las altas concentraciones de níquel (Verbruggen et al., 2008).

La importancia de los ligandos de alta afinidad a los metales es cada vez más clara por el papel que juegan en la homeostasis de estos metales. Se han identificado moléculas orgánicas que actúan como quelatantes (unión de cobre a otras moléculas) en la tolerancia a los metales y para la movilización y translocación en la planta y para garantizar la eficacia de almacenamiento en los frutos y semillas. En investigaciones recientes se han identificado una serie de ligandos, transportadores de los metales y se han caracterizado algunos candidatos potenciales que tiene una importante función en el transporte de la membrana celular. Entre los ligandos se encuentran el ácido mugineico y la nicotianamina, ácidos orgánicos como citrato, málico, oxálico, algunos aminoácidos como la histidina y fitato (Haydon et al., 2007). Sin embargo, la influencia del níquel sobre las reacciones bioquímicas de las plantas incluyendo las respuestas antioxidativas aún siguen siendo poco conocidas (Gajewska et al., 2007).

Plantas hiperacumuladoras de níquel y la fitorremediación

Las plantas hiperacumuladoras de metales han desarrollado mecanismos biológicos que les permiten vivir en suelos ricos en metales ya sea naturales (suelos serpentínicos o ultramáficos) como antropogénicos (Kidd et al., 2007) y pueden acumular altas concentraciones de níquel (1000 µg kg⁻¹ de peso seco) sin impactar su crecimiento y desarrollo. Actualmente se han descrito cerca de 300 especies y las familias más comunes son:

Asteraceae, Brassicaceae, Buxaceae, Euphorbiaceae, Rubiaceae, Flacourtiaceae y Violaceae. Se sugiere que las elevadas concentraciones de metales pesados en los tejidos epidérmicos podrían prevenir la penetración y propagación de microorganismos patógenos como hongos (Seregin y Kozhevnikova, 2006.)

Existen estudios genéticos que han confirmado la importancia de transporte de metales y procesos de detoxificación en la hiperacumulación y se ha considerado a la histidina como el más importante aminoácido involucrado en la hiperacumulación ya que forma complejos estables con el níquel, zinc y cadmio y se incrementa en la savia del xilema de la planta *Alysum lesbiacum* (Verbruggen et al., 2008).

La actividad antropogénica ha ocasionado el incremento de metales pesados en el suelo, lo cual se está convirtiendo en un grave problema ambiental con efectos negativos en la agricultura porque disminuyen la fertilidad del suelo, la actividad microbiana y pérdidas en la producción y para la salud humana a través de las cadenas alimentarias (Ma et al., 2009). Se ha demostrado que la acumulación del níquel inhibe el proceso de la nitrificación, mineralización del carbono y las actividades de las fosfatasas y arilsulfatasas en el suelo (Zaidi et al., 2005).

Las técnicas convencionales para la limpieza del suelo implican extracción e inmovilización de metales, sin embargo, son técnicas costosas y de negativo impacto en el ecosistema ya que en el proceso de eliminación de metales se emplean agentes físico-químicos que afectan la fertilidad del suelo (Zaidi et al., 2005).

Las plantas hiperacumuladoras constituyen un material biológico excepcional para la comprensión de la regulación de metales en las plantas así como sus mecanismos de adaptación a los ambientes extremos metálicos y tienen un uso potencial en la fitorremediación (Verbruggen et al., 2008).

La fitorremediación es el uso de plantas hiperacumuladoras que crecen en sitios contaminados y remueven o destruyen elementos dañinos para el suelo y es un método promisorio para contrarrestar la contaminación en suelo por metales pesados (Madhaiyan et al., 2007). En ese sentido, la aplicación de microorganismos en el suelo representa una alternativa viable porque implica la asociación con las raíces y forman comunidades únicas con un gran potencial como promotores de crecimiento para las plantas y destoxificación de metales en el suelo (Ma et al., 2009).

Los biosensores se consideran herramientas para caracterizar suelos contaminados y darle seguimiento al proceso de fitorremediación. Una cepa de la bacteria *Ralstonia eutropha* ha sido utilizada como biosensor microbial para predecir la biodisponibilidad de níquel en suelo y su transferencia a las plantas (Tibarzawa et al., 2001).

Se ha caracterizado una cepa de *Bacillus subtilis* capaz de facilitar la acumulación de níquel en la planta de mostaza (*Brassica juncea*) y así utilizarla como una alternativa en la fitorremediación combinada con rizobacterias de alta disponibilidad del metal. Se sugiere que la cepa de *Bacillus subtilis* debido a sus capacidades intrínsecas de promoción y crecimiento de las plantas y la atenuación de níquel del suelo por absorción y bioacumulación podría ser utilizada como bacterias fitoacumuladoras de este metal en zonas contaminadas (Zaidi et al., 2005).

En un estudio en Korea han utilizado a dos bacterias *Methylobacterium oryzae* y *Burkholderia* sp. para promover el crecimiento de las plantas de *Lycopersicon esculentum* y protegen contra la toxicidad de metales pesados como el níquel porque se reduce su captación y traslocación a los brotes de las plantas (Madhaiyan et al., 2007).

En Portugal, se caracterizaron bacterias asociadas a la rizósfera de *Alyssum serpyfolium* y *Pleum phleoides* creciendo en suelo serpentinos y seleccionaron cinco cepas de bacterias promotoras de crecimiento de plantas porque son capaces de utilizar 1-aminociclopropano -1- carboxilato como fuente de nitrógeno, además resultaron positivas para la producción del ácido indolacético y solubilización del fosfato y mostraron niveles significativos en la producción de sideróforos. La inoculación de bacterias aumentó la concentración de nitrógeno disponible y mejoraron la disponibilidad del níquel en los suelos (Ma et al., 2009)

Conclusiones

La actividad antropogénica está modificando las características naturales de los suelos y los metales pesados como el cobre y níquel se están incrementando, consecuentemente se generan desórdenes fisiológicos en las plantas debido a que de micronutrientes esenciales pasan a ser tóxicos.

La fitorremediación, a través de las plantas acumuladoras de metales representan una alternativa viable y se incrementa aún más con la aplicación de microorganismos que tiene dos funciones: promotores de crecimiento de las plantas y alta disponibilidad por los metales para su propio metabolismo.

Referencias

- 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
- Chmielowska, J., Veloso, J., Gutiérrez, J., Silvar, C., Díaz, J. 2010. Cross-protection of pepper plants stressed by copper against a vascular pathogen is accompanied by the induction of a defence response. *Plant Science* 178 (2010) 176–182.
- Ducic, T. and Polle, A. 2005. Transport and detoxification of manganese and copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol.* 17 (1): 103-112. 2005.
- Gajewska, Skłodowska, M. Słaba, and Mazur, J. 2006. Effect of nickel on antioxidative enzyme activities, proline and chlorophyll contents in wheat shoots. *Biologia Plantarum* 50 (4): 653-659.
- Gajewska, E. and Skłodowska M. 2007. Effect of nickel on ROS content and antioxidative enzyme activities in wheat leaves. *BioMetals* (2007) 20:27–36.
- Guo, X.Y., Zuo, Y.B., Wang, B. R., Li, J.M. and Ma, Y.B. 2010. Toxicity and accumulation of copper and nickel in maize plants cropped on calcareous and acidic field soils *Plant Soil* (2010) 333:365–373
- Haydon, M. J. and Cobbett, C. S. 2007. Transporters of ligands for essential metal ions in plants. *New Phytologist* (2007) doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02051.x

- Janas, K.M., Amarowicz, R., Zielinska-Tomaszewska, J., Kosinska, A., Posmyk, M.M. 2009. Induction of phenolic compounds in two dark-grown lentil cultivars with different tolerance to copper ions. *Acta Physiol Plant* (2009) 31:587–595.
- Kidd, P.S., Becerra C.C., García L. M., Monterroso C. 2007. Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum* L. *Ecosistemas* 16 (2): 26-43. Mayo 2007.
- León, M. J.M. y Sepúlveda, J.G. 2012. El daño por oxidación causado por cobre y la respuesta antioxidante de las plantas. *Interciencia*. Noviembre 2012, Vol. 37 No. 11.
- Ma, Y, Rajkumar, M. and Freitas, H. 2009. Improvement of plant growth and nickel uptake by nickel resistant-plant-growth promoting bacteria. *J. Hazard. Mater.* (2009) doi:10.1016/j.jhazmat.2008.12.018.
- Nishida, S., Tsuzuki C., Kato, A., Aisu, A., Yoshida, J. and Mizuno, T. 2011. AtIRT1, the Primary Iron Uptake Transporter in the Root, Mediates Excess Nickel Accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiol.* 52(8): 1433–1442 (2011).
- 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
- Shi-Sheng K. 2007. Effects of Cooper on the Photosynthesis and Oxidative Metabolism of *Amaranthus tricolor* Seedlings. *Agricultural in Science in China*. 2007, 6 (10): 1182-1192.
- Smeets, K., Opdenakker K, Remans T., Forzani, C., Hirt, H., Vangronsveld, J., and Cuypers, A. 2013. The role of the kinase OXI1 in cadmium-andcopper-induced molecular responses in *Arabidopsis thaliana* Plant, Cell and Environment (2013) 36, 1228–1238.
- Tibazarwa, C., Cobisier, P., Mench, M., Bossus, A., Solda, P., Mergeay, M., Wyns, L., Van der Lelie, D. 2001. A microbial biosensor to predict available nickel in soil and its transfer to plants. *Enviromental Pollution*. 113 (2001) 19-23.
- Todeschini, V., Franchin, C, Castiglione S., Burlando, B., Biondi, S, Torrigiani, P., Berta, G. and Lingua, G. 2007. Responses to copper of two registered poplar clones inoculated or not with arbuscular mycorrhizal fungi. *Caryologia* Vol. 60, no. 1: 146-155, 2007.
- Verbruggen, N., Hermans C. and Schat. H. 2009. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. *New Phytologist* (2009) 181: 759–776.
- Vinit-Dunand, F., Epron, D., Alaoui-Sosse, B., Badot, P.M. 2002. Effects of copper on growth and on photosynthesis of mature and expanding leaves in cucumber plants *Plant Science* 163 (2002) 53-58.
- Wang, S., Nan, Z., Liu, X., Li, Y., Qin, S. and Ding H. 2009. Accumulation and bioavailability of copper and nickel in wheat plants grown in contaminated soils from the oasis, northwest China. *Geoderma* 152 (2009) 290–295.
- Yruela, I. 2005. Copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol.* 17 (1): 145-156, 2005.
- 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

Madhaiyan, M. Poonguzhali, S. and Sa, T. 2007. Metal tolerating methylotrophic bacteria reduces nickel and cadmium toxicity and promotes plant growth of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) *Chemosphere* 69 (2007) 220–222.

Zaidi, S., Usmani, S., Singh B. and Musarrat J. 2006. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. *Chemosphere* 64 (2006) 991–997.