

EDITORIAL

El potencial de las micorrizas arbusculares en la agricultura desarrollada en zonas áridas y semiáridas

The potential of arbuscular mycorrhiza in the development of agriculture in arid and semi-arid zones

Alex Seguel Fuentealba



Doctor en Ciencias de Recursos Naturales
Núcleo Científico y Tecnológico en
Biorrecursos BIOREN-UFRO
Universidad de La Frontera
Email: alex.seguel@ufrontera.cl

Ph. D. in Natural Resources
Scientific and Technological Bioresource
Nucleus BIOREN-UFRO
Universidad de La Frontera
Email: alex.seguel@ufrontera.cl

La simbiosis micorrícica es la asociación hongo-planta más antigua y extendida del mundo, presente incluso en ecosistemas áridos, degradados y/o alterados por la actividad humana, incluidos los suelos altamente contaminados con residuos industriales (Finlay, 2008). Los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) son hongos del suelo pertenecientes al *phylum Glomeromycota* que normalmente forman asociaciones mutualistas con las raíces de la mayoría de las plantas vasculares (Jeffries *et al.*, 2003). En esta asociación, denominada micorriza arbuscular (MA), el hongo coloniza de manera extra e intercelular el cortex de la raíz, desarrollando un intrincado micelio externo que rodea la raíz de las plantas colonizadas. Este micelio forma una conexión continua entre la solución del suelo y la planta, lo que permite la captación de iones desde el suelo y su transporte a la raíz del hospedero, lo que influye de manera activa la nutrición mineral. En sentido inverso, el HMA recibe compuestos carbonados provenientes de la fotosíntesis de la planta, necesarios para su metabolismo por tratarse de un simbiote obligado, que requiere de la interacción con la planta para completar su ciclo de vida (Bago y Bécard, 2002).

Históricamente la investigación referente a las asociaciones micorrícicas se ha centrado en los efectos de la simbiosis en plantas individuales, en particular, en la mejora de adquisición de nutrientes

Mycorrhizal symbiosis is the oldest and most widespread fungus-plant association in the world; it is even present in arid and degraded systems and soils altered by human activity, including soils contaminated with industrial residues (Finlay, 2008). The fungi which develop arbuscular mycorrhiza (AMF) are soil fungi belonging to the phylum Glomeromycota, which normally form mutualistic associations with roots of the majority of vascular plants (Jeffries et al. 2003). In this association, known as arbuscular mycorrhizal (MA), the fungus colonizes the plant root cortex extra- and intracellularly, developing an intricate external mycelium which surrounds the roots of colonized plants allowing the capture of nutrients from the soil and transport to the inside of host root. AMF receive carbon compounds from plant photosynthesis, which are necessary for their metabolism. In addition, AMF are obligate symbionts which require interaction with the plant to complete their life cycle (Bago and Bécard 2002).

Historically research on mycorrhizal associations has been centered on the effects of the symbiosis in individual plants, especially on the improvement of acquisition of dissolved mineral nutrients such as phosphorus (P). This contribution becomes fundamental in the establishment and

minerales disueltos, como fósforo (P). Esta contribución se torna fundamental en el establecimiento y crecimiento vegetal de plantas que se desarrollan en condiciones adversas como zonas áridas con baja fertilidad (Jamil Mohammad *et al.*, 2003). Lo anterior, ya que incrementan el acceso de la planta a elementos nutritivos como P y nitrógeno (N) y para metales esenciales como cobre (Cu) y zinc (Zn) (Smith and Read, 2008). La absorción, transporte y transferencia de P del micelio a la planta es rápido y eficiente debido a la presencia de transportadores con alta afinidad al $H_2PO_4^-$ (Maldonado-Mendoza *et al.*, 2001), que actúan acoplado con un transportador simporte de H^+ a través de diversas H^+ -ATPasa (Ferrol *et al.*, 2002, Requena *et al.*, 2003). Por otro lado, algunos estudios hablan de la responsabilidad del micelio fúngico, ya sea solo, con bacterias u otros hongos, en la liberación de nutrientes desde partículas y rocas minerales mediante la meteorización (Finlay y Rosling, 2006).

Además de la baja fertilidad presente en zonas áridas se debe considerar la presencia de otros problemas ambientales como la alta concentración de metales, salinidad del suelo y sequía. En este contexto, el daño en el suelo y las plantas existentes en zonas áridas y semiáridas no es fácil de reparar debido a la fragilidad que presentan estos ecosistemas (Pascual *et al.*, 2000). Sin embargo, el impacto ecológico de la simbiosis MA es particularmente relevante para estos ecosistemas donde existe alta tolerancia de las plantas, en gran medida aportada por los HMA, a los estreses ambientales presentes en estos ecosistemas (Allen, 2007). Por esta razón, en investigaciones más recientes se ha ampliado el contexto en el que se estudia la simbiosis micorrízica, poniendo de manifiesto el rol del micelio fúngico en efectos ecosistémicos (Finlay *et al.*, 2008). En relación con lo anterior, varios estudios han mostrado el impacto positivo de las MA en conferir mayor resistencia a la planta frente a diversos metales tóxicos (Hildebrandt, 2007; Seguel *et al.*, 2013). Si bien los mecanismos en particular de tolerancia al metal pueden diferir entre los distintos metales y hongos estos principalmente están relacionados con la mejora nutricional de la planta, dada por la mayor absorción de P por parte del hospedero (Lux y Cumming 2001). Con respecto a esto, algunas estrategias de tolerancia por parte de la simbiosis MA han sido propuestas para Cu (Meier *et al.*, 2012) y aluminio (Al) (Seguel *et al.*, 2012; 2013). En general, el efecto protector es debido a la inmovilización del metal en estructuras intrarradicales y en la micorrizosfera, la zona inmediatamente cercana a la hifa externa del HMA. Por otro lado, se ha demostrado que el hongo destina algunas de sus estructuras de resistencia (esporas) al almacenamiento

growth of plants which develop in adverse conditions such as arid zones with low fertility (Jamil Mohammad et al., 2003), because it increases the access of the plant roots to nutritional elements such as P and nitrogen (N) and to essential metals such as copper (Cu) and zinc (Zn) (Smith and Read, 2008). The absorption, transport and transference of P from the mycelium to the plant is rapid and efficient, due to the presence of transporters with high affinity for $H_2PO_4^-$ (Maldonado-Mendoza et al. 2001), which act coupled with a symport carrier of H^+ by means of diverse H^+ -ATPases (Ferrol et al. 2002, Requena et al. 2003). Some studies mention the participation of the fungal mycelium, alone or in association with bacteria or other fungi, in nutrient liberation from mineral particles and rocks by meteorization (Finlay and Rosling, 2006).

As well as the low fertility of arid zones other environmental factors must be considered, such as high concentration of metals, soil salinity and drought. Damage to the soil and plants in arid and semi-arid zones is not easy to repair, due to the fragility of these ecosystems (Pascual et al., 2000). However, the ecological impact of AM symbiosis is particularly relevant for these ecosystems where the plants have high tolerance to the environmental stresses present, mostly due to the AM (Allen, 2007). For this reason more recent studies have widened the context in which mycorrhizal symbiosis is studied, investigating the role of the fungal mycelium in ecosystem effects (Finlay et al, 2008). Several studies have shown the positive impact of AM in conferring greater resistance to plants faced with diverse toxic metals (Hildebrandt, 2007; Seguel et al., 2013). Although the specific metal tolerance mechanisms may differ between different metals and fungi, these are mainly related to the nutritional improvement of the plant, given by the greater absorption of P by the fungus (Lux and Cumming 2001). Some tolerance strategies of the AM symbiosis have been proposed for Cu (Meier et al., 2012) and aluminum (Al) (Seguel et al., 2012; 2013). The protector effect is generally due to the immobilization of the metal in intraroot structures and in the mycorrhizosphere, the area adjacent to the external hyphae of the AM. It has also been shown that the fungus uses some of its resistant structures (spores) to sequester the metal, thereby reducing its concentration in the AM-plant system. Other studies showed that

del metal (Aguilera *et al.*, 2011; Cornejo *et al.*, 2013) reduciendo el efecto tóxico de este en el medio. Adicionalmente, otros estudios demuestran que la glomalina, una glicoproteína producida por los HMA y liberada al suelo en grandes cantidades, también tendría capacidad de inmovilizar cantidades importantes de metales (González-Chávez. 2004; Cornejo *et al.*, 2008, Aguilera *et al.*, 2011).

El beneficio que les otorgan los HMA a las plantas es variable en términos de adquisición de nutrientes o efectos en la tolerancia a estreses ambientales. Esto es consecuencia de una sustancial variación genética entre especies de HMA (Bever *et al.*, 2001) que pueden proporcionar beneficios en función de diferentes ambientes edáficos (Kelly *et al.*, 2005). Los ecosistemas naturales contienen diversas poblaciones nativas de HMA, que presentan distintos grados de variación en sus efectos sobre el crecimiento vegetal y la adquisición de nutrientes. Por esto, cambios en los entornos edáficos y medioambientales han repercutido en cambios en la abundancia y distribución de las especies de HMA (Bever *et al.*, 2001). Lo anterior ha provocado una coevolución de ambos simbioses, como resultado de un proceso de selección natural recíproco, lo que sumado a otros procesos ecológicos de presión acentúan la presencia de ecotipos mejor adaptados, eliminando los de menor eficacia biológica (Ashen y Goff, 2000). Por esta razón, es importante conocer la población nativa de HMA presente en los diferentes ecosistemas, como zonas áridas y semiáridas, para poder establecer mejores estrategias a la hora de producir un biofertilizante y/o la utilización de HMA para restablecer ambientes degradados. En general, estudios de diversidad realizados en ecosistemas áridos, semiáridos, salinos y/o con alta presencia de metales han llevado al descubrimiento de nuevas especies de HMA que se encuentran muy adaptados a estas condiciones (Estrada *et al.*, 2011; 2013, Teixeira-Rios *et al.*, 2013; Aguilera *et al.*, 2014).

La agricultura orgánica se está convirtiendo en un importante instrumento para mejorar la calidad de los suelos degradados por uso intensivo de productos químicos y/o pobres en su fertilidad como aquellos de zonas áridas y semiáridas. El uso de agentes biológicos como biopesticidas o biofertilizantes es una parte integral de la agricultura orgánica, especialmente en el cultivo de hortalizas. La simbiosis MA además de contribuir positivamente en las plantas mediante su rol biorregulador y bioprotector, ha demostrado un efecto positivo en la respuesta de plantas cuando se utilizan especies de HMA como biofertilizantes. Sin embargo, como se mencionó anteriormente se debe conocer la población nativa de HMA para hacer más óptimo el proceso de biofertilización. Diversos

glomalin, a glycoprotein produced by AM and liberated to the soil in large quantities, is also capable of immobilizing important quantities of metals (González-Chávez. 2004; Cornejo et al., 2008, Aguilera et al., 2011).

The benefit which AM provide to plants is variable in terms of nutrient acquisition and effects in the tolerance to environmental stresses. This is a consequence of substantial genetic variation among AM species (Bever et al., 2001), which can provide functional benefits in different edaphic environments (Kelly et al., 2005). Natural ecosystems have diverse native populations of AM species, which have different degrees of variation in their effects on plant growth and nutrient acquisition. Because of this, changes in environments and soils have had repercussions in the abundance and distribution of AM species (Bever et al., 2001). This has produced co-evolution of the symbiotic species, as a result of a process of reciprocal natural selection, which along with other ecological pressures accentuate the presence of the best-adapted ecotypes, eliminating those with less biological efficacy (Ashen and Goff, 2000). For this reason it is important to know the native MA species present in different ecosystems such as arid and semi-arid systems, to establish better strategies of bio-fertilizer production or to utilize MA to the re-establishment of degraded systems. Studies of diversity performed in arid, semi-arid, saline, or high-metal presence ecosystems have generally led to the discovery of new species of AM which are well-adapted to these conditions (Estrada et al., 2011; 2013, Teixeira-Rios et al., 2013; Aguilera et al., 2014).

Organic agriculture is becoming an important instrument to improve the quality of soils degraded by the intensive use of chemical products and/or degraded in fertility such as arid and semi-arid zones. The use of biological agents such as bio-pesticides or bio-fertilizers is an integral part of organic agriculture, especially in vegetable cultivation. AM symbiosis, besides it contribute on plant growth through its bio-regulator and bio-protector roles, has shown to have a positive effect on the response of plants when AM species are used as bio-fertilizers. However, as mentioned above the native AM population must be known to optimize the bio-fertilization process. A number of AM ecotypes show different degrees of resistance to the application of fertilizers and

ecotipos de HMA muestran diferentes grados de resistencia a la aplicación de fertilizantes y productos fitosanitarios, teniendo consecuencias de interés práctico la selección de HMA específicos para una planta en el suelo que ha recibido dichos aportes. Además, la combinación con otros microorganismos del suelo como la inoculación con rizobacterias puede aumentar significativamente la colonización MA mostrando un efecto positivo en la promoción del crecimiento vegetal.

En el último tiempo, los biofertilizantes, especialmente el uso de HMA, han surgido como un componente clave en el sistema integrado de nutrición vegetal y se proyectan como una importante solución para mejorar el rendimiento de los cultivos a través de un suministro de nutrientes más sustentable. Si a esto le sumamos el aporte de los HMA a la tolerancia de metales presentes en el suelo, propio de zonas áridas, se transforman en microorganismos clave para aumentar el rendimiento de cultivos producidos en estos ecosistemas. Por otro lado, el aumento en los precios de los insumos de fertilizantes fosfatados y las limitadas reservas de materia prima ha provocado que la estrategia de fertilización fosfatada sea cada vez menos viable en economías en desarrollo como Chile. Por lo anterior, los esfuerzos se han dirigido hacia la selección de plantas que sean capaces de adquirir el máximo de nutrientes desde el suelo y/o hacer más eficiente su uso al interior del vegetal, incluso bajo condiciones de estrés. Dentro de este contexto, es que la utilización de ecotipos de HMA adaptados a las condiciones del ambiente, y su manejo, mediante reproducción e inoculación de los inóculos nativos, cobra especial importancia.

En Chile, los Valles de Azapa y Lluta pertenecientes a la Región de Arica y Parinacota presentan altos niveles de arsénico y boro, y alta presencia de estos metales en las aguas de riego de estos valles (Figuroa *et al.*, 1988; Torres y Acevedo, 2008). Sin embargo, las características privilegiadas del clima en el valle de Azapa permiten tener una alta producción de hortalizas durante todo el año, siendo la producción de esta zona la que provee al resto del país en invierno (González Vallejos *et al.*, 2013). González Vallejos *et al.* (2013) informan, también, que uno de los desafíos de la agricultura en esta zona árida del norte de Chile es el manejo del cultivo, especialmente relacionado con las técnicas de riego y fertilización que den sustentabilidad a la actividad agrícola. Por lo tanto, considerar la utilización de comunidades nativas de HMA que estén adaptadas a la presencia de Boro y Arsénico podría transformarse en una alternativa a la hora de aumentar la producción de hortalizas.

phytosanitary products, which has practical consequences in the selection of specific AM species for a crop in a soil which has received these products. In addition, the combination with other soil microorganisms such as inoculation with rhizobacteria may increase significantly AM colonization, showing a positive effect in promoting plant growth.

In recent years bio-fertilizers, especially the use of AM, has become a key component in the integrated system of plant nutrition, and is projected as an important solution to improve crop yield by means of a more sustainable nutrient and water acquisition. Adding to this the contribution of AM in the tolerance to metals present in the soil in arid zones, they become key microorganisms to increase the yield of crops produced in these ecosystems.

The price increase of phosphate fertilizers and the limited reserves of raw material have made the strategy of phosphate fertilization less viable in developing countries such as Chile. Because of this, effort has been directed to the selection of plants which are capable of acquiring maximum nutrients from the soil and/or have more efficient use of nutrients, even under stress conditions. This is why the utilization of AM adapted to the conditions of the environment and their management by reproduction and inoculation is especially important.

*The Azapa and Lluta Valleys in the Región de Arica y Parinacota of Chile have high levels of arsenic and boron and high presence of these metals in the irrigation water of these valleys (Figuroa *et al.*, 1988; Torres and Acevedo, 2008). However, the privileged characteristics of the climate in the Azapa Valley allow vegetable production during the whole year; it is this area which supplies the rest of the country in winter (González Vallejos *et al.*, 2013). This report also indicated that one of the challenges of agriculture in this arid zone of northern Chile is crop management, especially related to irrigation and fertilization techniques which provide sustainability to agricultural activities. Thus the utilization of native AM communities which are adapted to the presence of boron and arsenic could be an alternative to increase vegetable production in such habitats.*

The aim of this editorial is to emphasize the manipulation and utilization of AM as a biological tool for the recovery of ecosystems which have high

El objetivo de este editorial es destacar que la manipulación y utilización de HMA como una herramienta biotecnológica para la recuperación de ecosistemas que presentan altos niveles de metales, y su rol como promotor del crecimiento vegetal y mejorador de las condiciones fisicoquímicas del suelo debe tenerse en cuenta al momento de diseñar los manejos agronómicos en zonas áridas y semiáridas como las existentes en el norte grande de Chile. En este contexto mejoraría la nutrición vegetal del cultivo y disminuiría la concentración del metal tóxico en el suelo, sobre todo en el valle de Lluta donde la concentración de boro es mayor. Esto también permitiría, junto a otras estrategias de manejo de suelos y agua, el desarrollo de otras especies agronómicas menos tolerantes a este metal aumentando el valor productivo de estos suelos, lo que se transformaría a largo plazo en un aporte real al desarrollo agronómico y económico de la Región de Arica y Parinacota.

levels of metals, and their role as a promoter of plant growth and improvement of the physical-chemical conditions of the soil; these should be taken into account in the design of agronomic management in arid and semi-arid zones such as those present in northern Chile.

This would improve crop nutrition and reduce the concentration of toxic metals in the soil, especially in the Lluta Valley where the concentration of boron is greater. It would also allow, together with other soil and water management strategies, the development of other agronomic species less tolerant to this metal, increasing the productive value of these soils, which in the long run would be an important contribution to the agricultural and economic development of the Región de Arica y Parinacota.

Literatura Citada

- Aguilera, P., Borie, F., Seguel, A., Cornejo, P.
2011. Fluorescence detection of aluminum in arbuscular mycorrhizal fungal structures and glomalin using confocal laser scanning microscopy. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 2427-2431.
- Aguilera, P., Cornejo, P., Borie, F., Barea, J.M., von Baer, E., Oehl, F.
2014. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Triticum aestivum* L. plants growing in an Andosol with high aluminum level. *Agriculture, Ecosystem and Environment Journal*. DOI: 10.1016/j.agee.2014.01.029 (*In press*).
- Allen, M.F.
2007. Mycorrhizal fungi: highways for water and nutrients in arid soils. *Vadose Zone Journal*, 6 (2) 291-297.
- Ashen, J., Goff, L.
2000. Molecular and Ecological Evidence for Species Specificity and Coevolution in a group of Marine Algal-Bacterial Symbiosis. *Applied and Environmental Microbiology*, 66: 3024-3030.
- Bago, B., Bécard, G.
2002. Bases of the obligate biotrophy of arbuscular mycorrhizal fungi. In: Eds. Gianinazzi S., Schüepp H., Barea J.M., Haselwandter K. *Mycorrhizal Technology in Agriculture*. Birkhäuser Verlag Basel, Switzerland. pp. 33-48.
- Bever, J.D., Schultz, P., Pringle, A., Morton, J.
2001. Arbuscular mycorrhizal fungi: more diverse than meets the eye, and the ecological tale of why. *Bioscience*, 51: 923-931.
- Cornejo, P., Meier, S., Borie, G., Rillig, M., Borie, F.
2008. Glomalin-related soil protein in a Mediterranean ecosystem affected by a copper smelter and its contribution to Cu and Zn sequestration. *Science of the Total Environment*, 406: 154-160.
- Cornejo, P., Perez-Tienda, J., Meier, S., Valderas, A., Borie, F., Azcon-Aguilar, C., Ferrol, N.
2013. Copper compartmentalization in spores as a survival strategy of arbuscular mycorrhizal fungi in Cu-polluted environments. *Soil Biology and Biochemistry*, 57: 925-928.
- Estrada, B., Palenzuela, J., Barea, J.M., Ruiz-Lozano, J.M., da Silva, G.A., Oehl, F.
2011. *Diversispora clara* (Glomeromycetes) - a new species from saline dunes in the Natural Park Cabo de Gata (Spain). *Mycotaxon*, 118: 73-81.
- Estrada, B., Aroca, R., Barea, J.M., Ruiz-Lozano, J.M. 2013. Native arbuscular mycorrhizal fungi isolated from a saline habitat improved maize antioxidant systems and plant tolerance to salinity. *Plant Science*, 201: 42-51.
- Figueroa, L., Zepeda, J., Sciaraffia, R.
1988. Niveles de arsénico en suelos de tres valles de Arica y su relación con el nivel y magnificación de Alfalfa. *Agricultura Técnica (Chile)*, 48(3): 206-211.
- Ferrol, N., Barea, J.M., Azcón-Aguilar, C.
2002. Mechanism of nutrient transport across interfaces in Arbuscular mycorrhizas. *Plant and Soil*, 244: 231-237.
- Finlay, R.D.
2008. Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis with special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*, 59: 1115-1126.
- Finlay, R.D., Lindahl, B.D., Taylor, A.F.S.
2008. Responses of mycorrhizal fungi to stress. In: Avery S., Stratford M., van West P., editors. *Stress in yeasts and filamentous fungi*. Amsterdam: Elsevier; 2008. pp. 201-220.
- Finlay, R., Rosling, A.
2006. Integrated nutrient cycles in forest ecosystems, the role of ectomycorrhizal fungi. In: Gadd GM (ed) *Fungi in biogeochemical cycles*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 28-50.

- González-Chávez, M.C., Carrillo-González, M., Wright, S.F., Nichols, K.A.
2004. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, 130: 317-323.
- González-Vallejos, F., Riquelme, A., Contreras, P., Mazuela, P.
2013. Antecedentes generales para la sustentabilidad de la producción hortícola en el valle de Azapa, Arica, Chile. *IDESIA (Chile)*, 31(4): 119-123.
- Hildebrandt, U., Regvar, M., Bothe, H.
2007. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry*, 68: 139-146.
- Jamil, Mohammad, M., Rushdi Hamad, S., Issamalkawi, H.
2003. Population of arbuscular mycorrhizal fungi in semiarid environment of Jordan as influenced by biotic and abiotic factors. *Journal of Arid Environments*, 53: 409-417.
- Jeffries, P., Gianinazzi, S., Perotto, S., Turnau, K., Barea, J.
2003. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, 37: 1-16.
- Kelly, C.N., Morton, J.B., Cumming, J.R.
2005. Variation in aluminum resistance among arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 15:193-201.
- Lux, H., Cumming, J.
2001. Mycorrhizae confer aluminum resistance to tulippoplar seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 694-702.
- Maldonado-Mendoza, I.E., Dewbre, G.R., Harrison, M.J.
2001. A phosphate transporter gene from the extra-radical mycelium of an arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* is regulated in response to phosphate in the environment. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 14: 1140-1148.
- Meier, S., Bolan, N., Borie, F., Cornejo, P.
2012. Phytoremediation of metal polluted soils by arbuscular mycorrhizal fungi. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42: 741-775.
- Pascual, J.A., García, C., Hernández, T., Moreno, J.L., Ros, M.
2000. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13): 1877-1883.
- Requena, N., Breuninger, M., Franken, P., Ocón, A.
2003. Symbiotic Status, Phosphate, and Sucrose Regulate the Expression of Two Plasma Membrane H⁺-ATPase Genes from the Mycorrhizal Fungus *Glomus mosseae*. *Plant Physiology*, 132: 1540-1549.
- Seguel, A., Medina, J., Rubio, R., Cornejo, P., Borie, F.,
2012. Effects of soil aluminum on early arbuscular mycorrhizal colonization of aluminum tolerant wheat and barley cultivars. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72, 449-455.
- Seguel, A., Cumming, J., Klugh-Stewart, K., Cornejo, P., Borie, P.,
2013. The role of arbuscular mycorrhizas in decreasing aluminium phytotoxicity in acidic soils: a review. *Mycorrhiza* 23, 167-183.
- Smith, S.E., Read, D.J.
2008. *Mycorrhizal symbiosis*. 3rd ed. San Diego: Academic Press. 787 p.
- Teixeira-Rios, T., Gomes de Souza, R., Costa Maia, L., Oehl, F., Pereira, C.
2013. Arbuscular mycorrhizal fungi in a semi-arid, limestone mining-impacted area of Brazil. *Acta Botanica Brasílica*, 27(4): 688-693.
- Torres, A., Acevedo, E.
2008. El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los Valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile. *IDESIA (Chile)*, 26 (3): 31-44.