

HONGOS ENDÓFITOS ASOCIADOS A LA RAÍZ DEL CULTIVO DE LA QUINUA (*Chenopodium quinoa* W.) EN EL ALTIPLANO DE BOLIVIA

Endophytic fungi associated with the root of the quinoa crop (*Chenopodium quinoa* W.) in the highlands of Bolivia

Edwin Marcelo Gonzales Torrico¹, Fernando Pacasa Quisbert²

RESUMEN

Los hongos endófitos presentan asociaciones mutualistas con las raíces de las plantas este tipo de asociaciones son importantes para la sobrevivencia de plantas en ambientes extremos. Actualmente, este tipo de hongos tienen un gran potencial biotecnológico en la resistencia de las plantas a factores abióticos. El objetivo del estudio fue describir la comunidad de hongos endófitos asociados con la raíz del cultivo de quinua que crecen en el altiplano sur de Bolivia. Se aislaron hongos endófitos de la raíz empleando el método de placas de fragmentos de quinua. Los aislados se identificaron por taxonomía morfológica. Se aislaron 20 morfotipos, siendo los géneros más abundantes *Fusarium* (7 sp) y *Penicillium* (1 sp), sin embargo, 12 cepas no fueron identificados por métodos morfológicos tradicionales. Este estudio reporta la abundancia y diversidad de hongos endófitos en el cultivo de quinua del altiplano boliviano, algunos hongos tendrían un rol potencial de tolerancia a las condiciones de estrés abiótico.

Palabras clave: hongos, endófitos, quinua, diversidad.

ABSTRACT

Endophytic fungi exhibit mutualistic associations with plant roots. These types of associations are important for plant survival in extreme environments. Currently, these types of fungi have great biotechnological potential in plant resistance to abiotic factors. The objective of this study was to describe the community of endophytic fungi associated with the roots of quinoa crops growing in the southern highlands of Bolivia. Endophytic fungi were isolated from the roots using the quinoa fragment plate method. Isolates were identified by morphological taxonomy. 20 morphotypes were isolated, the most abundant genera being *Fusarium* (7 sp) and *Penicillium* (1 sp); however, 12 strains were not identified by traditional morphological methods. This study reports the abundance and diversity of endophytic fungi in quinoa crops in the Bolivian highlands. Some fungi could have a potential role in tolerance to abiotic stress conditions.

Keywords: fungi, endophytes, quinoa, diversity.

¹ ✉ Universidad Técnica de Oruro, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9406-1215>. edwin.gonzales@doc.uto.edu.bo

² Universidad Técnica de Oruro, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7155-8322>. pacasafer@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La quinua (*Chenopodium quinoa* W.) ha emergido como un cultivo altamente nutritivo y resistente a factores climáticos adversos como la salinidad y la sequía, así mismo, es ampliamente cultivado en el altiplano de Bolivia (Bazile et al., 2016). A pesar de su resiliencia, el cultivo de quinua enfrenta diversos problemas que limitan su producción y calidad (Bhargava y Shukla, 2005).

La diversidad de hongos endófitos en el cultivo de quinua (Gamboa-Gaitán, 2006), desempeña un papel importante en la resistencia al estrés hídrico, salinidad, promoción del crecimiento y resistencia a enfermedades (Gonzales-Teuber et al., 2017; Paco et al., 2025).

Estudios previos han destacado la importancia y la complejidad de las comunidades de hongos endófitos en diferentes sistemas vegetales (Arnold et al., 2003; Porras-Alfaro 2011). La comprensión integral de sus roles y su diversidad aún es limitada, estudios realizados en el Altiplano Sur de Bolivia, identificó a *Penicillium* spp., *Aspergillus* spp. y *Trichoderma* spp. como los hongos predominantes en suelos productores de quinua (Paco-Pérez et al., 2017). Otra muestra de la diversidad de hongos microscópicos en el Altiplano se encuentra en los estudios de Pacasa-Quisbert (2018), quien identifica 44 especies de hongos filamentosos en el Altiplano Norte, de manera similar, Tarqui-Aruquipa (2016) registró la presencia de hongos vesiculares arbusculares en el Altiplano Central.

Los hongos endófitos son microorganismos que viven dentro de los tejidos de las plantas sin causar daño aparente (Gamboa-Gaitán, 2006). Los hongos endófitos mejoran el crecimiento de las plantas al proporcionar nutrientes esenciales, como nitrógeno y fósforo, a través de su actividad metabólica, algunos hongos endófitos pueden ayudar a las plantas a resistir enfermedades al producir metabolitos secundarios con propiedades antimicrobianas (Sánchez-Fernández et al., 2013). Tolerancia al estrés abiótico pueden ayudar a las plantas a tolerar condiciones de sequías y salinidad, mediante la producción de compuestos que mejoran la resistencia al estrés (Abello y Kelemu 2007). Estudios realizados en el altiplano se aislaron 417 cepas y los géneros predominantes fueron cepas de *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Phialophora*, *Alternaria*, *Aspergillus* y *Fusarium*, así mismo, se han encontrado cepas beneficiosas como

Humicola, *Trichoderma* y *Verticillium*, otras especies no fueron identificadas debido a la dificultad morfológica (Pacasa-Quisbert, 2018) sobre la evidencia de la existencia de hongos es necesario explorar la diversidad, abundancia y frecuencia de hongos endófitos asociados a la raíz del cultivo de la quinua.

El desconocimiento sobre la diversidad y función de los hongos endófitos ha sido un tema de interés en la investigación científica existe la necesidad de investigaciones adicionales de abordar preguntas fundamentales sobre la ecología y evolución de estas simbiosis (Hardoim et al., 2015). Los hongos endófitos se han estudiado como posibles alternativas para abordar problemas fitosanitarios en los cultivos (Chichi, 2020). Los hongos endófitos pueden ofrecer una alternativa biológica para la protección de cultivos, pero su desconocimiento podría llevar a la falta de aprovechamiento de estas soluciones (Serruto, 2016).

En el presente artículo se describe la diversidad y frecuencia de los hongos endófitos en el cultivo de la quinua, el cual para los ecosistemas alto andinos son desconocidos y su estudio podría contribuir al conocimiento de la diversidad de hongos endófitos de la quinua y sus posibles aplicaciones biotecnológicas en los sistemas de producción de la quinua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo de raíces de *Chenopodium quinoa*

Las raíces de las plantas de *Chenopodium quinoa* fueron recolectadas a una profundidad de 20 cm, de la localidad de Condoriri (17° 32' 30" S 67°14' 26" O, 3 760 m s.n.m.), ubicado a 11 km del municipio de Caracollo del departamento de Oruro específicamente en el altiplano central de Bolivia, ecorregión semiárido, con temperaturas promedio anual de 7 °C y precipitación de 400 mm (Ibisch et al., 2004). Por otro lado, se recolectaron muestras de la localidad de Salinas de Garci Mendoza, altiplano sur (19° 38' 16" S 67° 40' 31" O) ubicado a 261 km de la ciudad de Oruro. Se recolectaron 10 plantas al azar de una parcela de *C. quinoa*, las plantas estaban aparentemente sanas y en etapa de floración de la variedad Real Blanca en las dos localidades.

Aislamiento de los hongos endófitos

Se separaron las raíces de las plantas y se seleccionaron raíces primarias y secundarias, sin daños visibles y sin síntomas de enfermedad. Las raíces se

lavarón con agua destilada para eliminar restos de detritus vegetales, materia orgánica y suelo. Posteriormente, la superficie de las raíces se desinfectó con alcohol (70 %) durante 3 min, seguido de hipoclorito de sodio (1 %) durante 1 min y después se enjuagó tres veces en agua destilada estéril durante 3 min cada uno (Gonzales-Teuber et al., 2017). Posteriormente, se cortaron secciones de raíces esterilizadas de 5 mm y seguidamente fueron inoculadas en medio de cultivo papa dextrosa agar (PDA). Las placas se incubaron a temperatura ambiente durante cuatro semanas. Durante ese tiempo, las colonias emergentes fueron subcultivadas en medio PDA hasta obtener cultivos puros.

Identificación a nivel género

Los hongos endófitos aislados de la raíz de *C. quinoa* fueron identificados mediante estructuras micro morfológicas. Las estructuras reproductivas fueron observadas a través del microscopio empleando la técnica cinta pegante y empleando ácido láctico (60 %) como líquido de montaje. Las características morfológicas de los hongos fueron comparadas con descripciones disponibles en bibliografía y claves taxonómicas de Barnett y Hunter (1998), para su posterior identificación, mediante microscopía se realizaron preparaciones microscópicas de hongos aislados para la forma y tamaño de esporas.

Análisis de frecuencia

Se realizó el recuento de cepas y se enumeraron los hongos endofíticos aislados en cada muestra de tejido vegetal (raíz), las colonias emergentes fueron subcultivadas para obtener aislamientos puros. Los aislamientos de hongos se agruparon según sus características morfológicas similares posteriormente de la agrupación se calculó la ocurrencia y frecuencia de los hongos en la raíz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diversidad y abundancia de hongos endófitos

Entre la diversidad de hongos endófitos de *C. quinoa* se encontraron los géneros de *Penicillium* spp. y *Fusarium* spp. Se identificaron por taxonomía morfológica un morfotipo de *Penicillium*, siete de *Fusarium* (Figura 1). Los restantes 12 morfotipos de endófitos no fueron identificados debido a que no presentaron estructuras reproductivas, la composición de especies endófitos y su frecuencia varía de acuerdo a la especie del hospedero, características del sitio, elevación, tipo de asociación vegetal y edad del tejido (Mueller, 2004) estas condiciones regularmente no se desarrollan con los medios de cultivos lo que limite su formación de estructuras reproductivas (Paco et al., 2025).

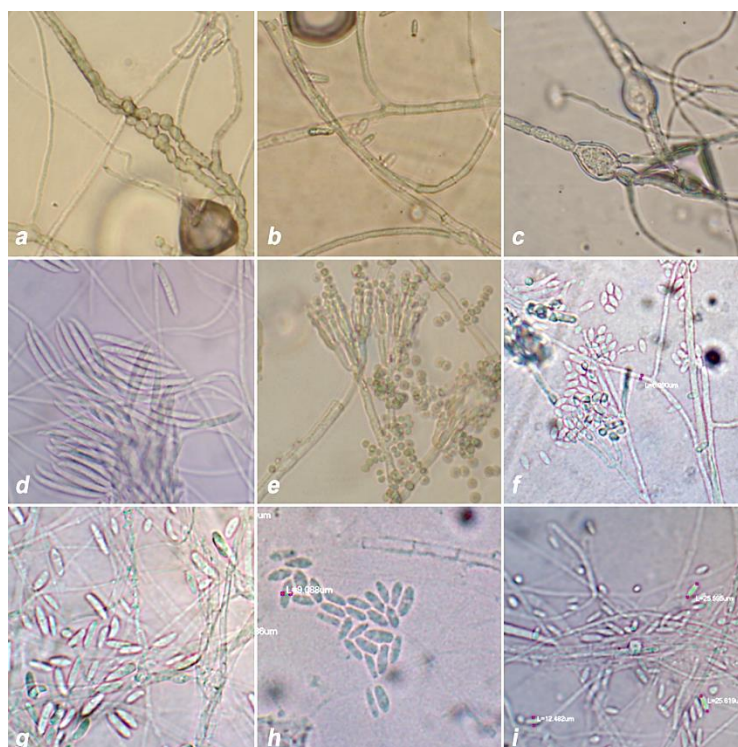


Figura 1. Géneros de hongos endófitos identificados de la raíz de *C. quinoa* (d-i: *Fusarium*; e: *Penicillium*; a-c-f-g-h: Sin identificar).

Frecuencia hongos endófitos de las raíces

El análisis de las cepas de hongos endófitos aislados de *Chenopodium quinoa* evidenció la dominancia del género *Fusarium* spp. (7 cepas aisladas), seguido por una cepa de *Penicillium* spp. y un grupo significativo de morfotipos no identificados que presentan diferentes características morfológicas en medio de cultivo PDA (12 cepas, 57.1 % del total), lo que sugiere una comunidad fúngica altamente diversa y estructurada por factores ambientales y ecológicos específicos. El género *Fusarium* spp. podría indicar una relación simbiótica clave con la quinua, aunque su papel como endófito beneficioso o patógeno potencial debe ser investigado en mayor profundidad. La baja frecuencia de *Penicillium* spp. podría deberse a su menor capacidad de colonización endófitas en esta planta o a condiciones ambientales poco favorables para su desarrollo.

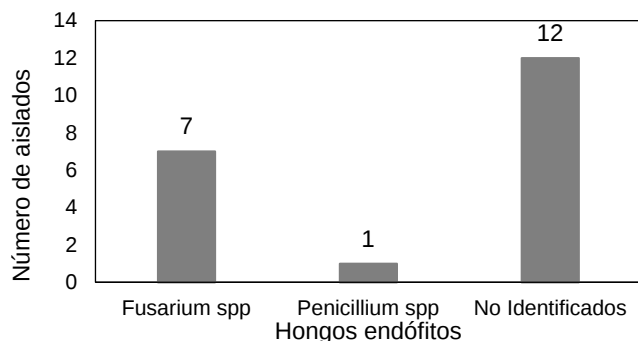


Figura 2. Frecuencia de hongos aislados desde la raíz de *Chenopodium quinoa*.



Figura 3. Forfotipos de hongos endófitos aislados de la raíz de *C. quinoa* (imagen de placas anversos) (a-j: no identificados; k-m: *Fusarium* spp.; n: *Penicillium* spp.)

La presencia de diversos géneros de hongos endófitos en *Chenopodium quinoa* W., incluyendo *Penicillium* spp. y *Fusarium* spp., refleja la complejidad de la comunidad microbiana endófitas en este cultivo. Este hallazgo es consistente con estudios previos que han documentado la diversidad de hongos endófitos en una variedad de plantas hospedadoras (Rodríguez et al., 2009). La identificación de múltiples morfotipos de *Penicillium* y *Fusarium* mediante taxonomía morfológica es congruente con la capacidad de estos géneros para colonizar una amplia gama de plantas y su adaptabilidad a diversos ambientes (Saikkonen et al., 2004). La incapacidad para identificar 12 morfotipos adicionales debido a la falta de estructuras reproductivas subraya los desafíos en la caracterización taxonómica de hongos endófitos y destaca la necesidad de métodos moleculares complementarios para una identificación más precisa (Hardoim et al., 2015).

El estudio realizado sobre la diversidad taxonómica y funcional de hongos endófitos en raíces de *Chenopodium quinoa* evidenció una notable heterogeneidad microbiana, identificando específicamente los géneros *Fusarium* spp. y *Penicillium* spp. (González-Teuber et al., 2017) encontró en la raíz de la *C. quinoa* *Penicillium*, *Phoma* y *Fusarium*, como hongos más abundantes, así como 12 morfotipos no identificados morfológicamente por la ausencia de estructuras reproductivas. De los 20 morfotipos aislados, siete correspondieron a diferentes especies de *Fusarium* y una a *Penicillium*, reflejando la predominancia de estos grupos en el microbioma radicular de la quinua. Las descripciones morfológicas detalladas revelaron una amplia variación en características como el micelio, diámetro de colonias, presencia de macroconidios y clamidiosporas, evidenciando la plasticidad adaptativa de estos endófitos en ambientes edáficos adversos típicos del altiplano andino. La presencia de hongos endófitos en todas las raíces analizadas confirma la simbiosis del tipo mutualista (Mueller, 2004). Tsavkelova et al. (2006) menciona que la cepa *Fusarium* puede producir auxinas, citoquininas y giberilinas que establecerían una relación entre quinua y su microbiota fúngica, coincidiendo con observaciones previas sobre la ubiquidad de endófitos en plantas hospedadoras (Rodríguez et al., 2009; Saikkonen et al., 2004). Sin embargo, la imposibilidad de identificar un número significativo de morfotipos subraya las limitaciones de la taxonomía morfológica clásica y la necesidad de incorporar técnicas moleculares como la secuenciación de ADN para una caracterización precisa, tal como lo

sugieren Hardoim et al. (2015). Estos hallazgos no solo amplían el conocimiento sobre la diversidad microbiana asociada a la quinua, sino que también destacan su potencial funcional en la promoción del crecimiento vegetal y la tolerancia a estreses abióticos, abriendo nuevas perspectivas para el uso biotecnológico de estos endófitos en sistemas agrícolas sostenibles.

CONCLUSIONES

El presente estudio ha permitido caracterizar la diversidad taxonómica y funcional de los hongos endófitos asociados a las raíces de *Chenopodium quinoa* en base a criterios morfológicos y microbiológicos. Se identificaron los géneros *Fusarium* spp. (7) y *Penicillium* spp. (1), junto con 12 morfotipos adicionales cuya identificación taxonómica no fue posible debido a la ausencia de estructuras reproductivas discernibles.

Los hallazgos evidencian que la comunidad microbiana endófito de la quinua es altamente diversa y se encuentra dominada por especies de *Fusarium*, lo que sugiere un papel potencialmente significativo de estos hongos en la fisiología y la ecología de la planta hospedera. La presencia de múltiples morfotipos indica que la colonización de las raíces por hongos endófitos responde a interacciones ecológicas complejas, donde factores como la disponibilidad de nutrientes, las condiciones edafoclimáticas y la competencia interespecífica podrían estar modulando su estructura y función.

Asimismo, las limitaciones para identificar 12 morfotipos debido a la ausencia de estructuras reproductivas destaca las limitaciones inherentes a la caracterización morfológica y subraya la necesidad de incorporar herramientas de biología molecular, como la secuenciación del ADN ribosomal, para lograr una identificación taxonómica más precisa y detallada.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados obtenidos abren nuevas líneas de investigación sobre la posible contribución de estos hongos endófitos en la adaptación de la quinua a condiciones de estrés abiótico, particularmente en suelos marginales y con bajos niveles de fertilidad. Estudios futuros deberán evaluar la capacidad de estos microorganismos para promover el crecimiento vegetal y mejorar la resistencia a enfermedades, con el fin de explorar su potencial en estrategias de biotecnología agrícola sostenible.

Finalmente, este trabajo contribuye al conocimiento de la microbiota endófito de *Chenopodium quinoa*, proporcionando una base científica para futuras investigaciones orientadas al aprovechamiento de estos microorganismos en la biofertilización y el control biológico de patógenos en cultivos de importancia agronómica.

Agradecimientos

Quisiéramos expresar nuestro más profundo agradecimiento a la Facultad de Ciencias Agrarias y Naturales por su incansable dedicación y compromiso en la realización de investigaciones que contribuyen al desarrollo sostenible de nuestro entorno. Su labor no solo enriquece el conocimiento científico, sino que también impulsa

BIBLIOGRAFÍA

- Abello, JF; Kelemu, S. 2007. Hongos endófitos: ventajas adaptativas que habitan en el interior de las plantas (en línea). Ciencia & Tecnología Agropecuaria 7(2):5557. Disponible en https://doi.org/10.21930/rcta.vol7_num2_art:70
- Arnold, AE; Mejía, LC; Kylo, D; Rojas, EI; Maynard, Z; Robbins, N; Herre, EA. 2003. Fungal endophytes limit pathogen damage in a tropical tree (en línea). Proceedings of the National Academy of Sciences 100(26):15649-15654. Disponible en <https://doi.org/10.1073/pnas.2533483100>
- Barnett, HL; Hunter, BB. 1998. Illustrated Genera of Imperfect Fungi. 4ta ed. Minnesota, USA: APS Press. 218 p.
- Bazile, D; Jacobsen, SE; Verniau, A. 2016. The global expansion of quinoa: Trends and limits (en línea). Frontiers in Plant Science 7:622. Disponible en <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2016.00622/full>
- Bhargava, A; Shukla, S. 2005. Dioscorine from Dioscorea bulbifera enhanced growth and lignification in Ziziphus mauritiana stem. Physiological and Molecular Plant Pathology 66(1-2):14-22.
- Chichi, L. 2020. Diversidad de hongos endófitos asociados a una variedad comercial de *Carica papaya* L. en la península de Yucatán (en línea). Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Disponible en https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1655/1/PCB_M_Tesis_2020_Lucia_Chi_Chi.pdf
- Sánchez-Fernández, ER; Sánchez-Ortiz, BL; Sandoval-Espinosa, YKM; Ulloa-Benítez, Á; Armendáriz-Guillén, B; García-Méndez, CM; Macías-Rubalcava, L. 2013. Hongos endófitos: fuente potencial de metabolitos secundarios bioactivos con utilidad en agricultura y medicina (en línea). Tip Revista especializada en ciencias químico-biológicas 16(2):132-146. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-888X2013000200006

- Gamboa-Gaitán, MA. 2006. Hongos Endófitos Tropicales: Conocimiento actual y perspectivas (en línea). Acta Biológica Colombiana 11(1):3-20. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2006000300001
- González-Teuber, M; Vilo, C; Bascuñán-Godoy, L. 2017. Molecular characterization of endophytic fungi associated with the roots of *Chenopodium quinoa* inhabiting the Atacama Desert, Chile (en línea). Genomics Data 11:109-112. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.gdata.2016.12.015>
- Hardoim, PR; van Overbeek, LS; Berg, G; Pirttilä, AM; Compant, S; Campisano, A; Sessitsch, A. 2015. The hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes (en línea). Microbiology and Molecular Biology Reviews 79(3):293-320. Disponible en <https://doi.org/10.1128/mmb.00050-14>
- Ibisch, PL; Beck, SG; Gerkmann, B; Carretero, A. 2004. Ecorregiones y ecosistemas. En P. L. Ibisch & G. Mérida (Eds.). Biodiversidad: la riqueza de Bolivia: estado de conocimiento y conservación (pp. 47-88). Santa Cruz de la Sierra, Bolivia: Editorial FAN.
- Mueller, GM. 2004. Biodiversity of fungi: inventory and monitoring methods. 1ra ed. Elsevier (ed.). California, s.e. 255 p.
- Pacasa-Quisbert, F. 2018. Recursos genéticos de hongos (en línea). Journal of the Selva Andina Biosphere 6(1). http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2308-38592018000100004
- Paco-Pérez, V; Loza-Murguía, M; Vino-Nina, L; Calani-Bueno, E; Serrano-Canaviri, T. 2017. Población fúngica en suelos productores de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.), bajo diferentes sistemas de manejo en la comunidad Kerecaya, municipio de Salinas de Garci Mendoza (en línea). Revista de la Sociedad de Investigación Selva Andina 8(1):26-47. Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=361349918003>
- Paco, V; Melgar, C; Fabiana, C; Quisbert, FP. 2025. Evaluation of growth promotion and pathogenicity of endophytic fungi from the root of *Chenopodium quinoa* Willd. (en línea). American Journal of BioScience 13(1):1-10. Disponible en <https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.ajbio.20251301.11>
- Porras-Alfaro, A; Bayman, P. 2011. Hidden fungi, emergent properties: endophytes and microbiomes (en línea). Annual Review of Phytopathology 49:291-315. Disponible en <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080508-081831>
- Rodríguez, RJ; White JrJF; Arnold, AE; Redman, RS. 2009. Fungal endophytes: diversity and functional roles (en línea). New Phytologist 182(2):314-330. Disponible en <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>
- Saikkonen, K; Wäli, P; Helander, M; Faeth, S H. 2004. Evolution of endophyte-plant symbioses (en línea). Trends in Plant Science 9(6):275-280. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1360138504001025>
- Serruto, S. 2016. Aislamiento y caracterización de hongos endófitos (en línea). Tesis de Grado. Pontificia Universidad Javeriana. Disponible en <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/43166/Trabajo%20Grado%20Santiago%20Serrato.pdf?sequence=1>
- Tarqui, NN. 2016. Caracterización de los hongos VA en parcelas en descanso y su relación con la temperatura en tres comunidades de Patacamaya - La Paz. Tesis de Ingeniería. Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- Tsavkelova, EA; Klimova, SY; Cherdyntseva, TA; Netrusov, AI. 2006. Microbial producers of plant growth stimulators and their practical use: A review (en línea). Applied Biochemistry and Microbiology 42(2):117-126. Disponible en <https://doi.org/10.1134/S0003683806020013>

Artículo recibido en: 19 de noviembre del 2024

Aceptado en: 07 de abril del 2025