

BENEFICIOS DE LAS MICORRIZAS ARBUSCULARES EN TÉCNICAS DE FITORREMEDIACIÓN PARA DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS EN ECUADOR

BENEFITS OF ARBUSCULAR MYCORRHIZAE IN PHYTOREMEDIATION TECHNIQUES FOR SOIL DECONTAMINATION IN ECUADOR

Oscar Oswaldo Prieto Benavides^{1*}

¹ Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4101-0523>. Correo: oprieto@uteq.edu.ec

Juan Pablo Urdánigo Zambrano²

² Carrera de Biología, Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8972-0279>. Correo: jurdanigo@uteq.edu.ec

Magina Noelia Sánchez Loor³

³ Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3831-009X>. Correo: msanchezl2@uteq.edu.ec

Narcisa Claribel Sánchez Loor⁴

⁴ Carrera de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5105-6205>. Correo: nsanchezl2@uteq.edu.ec

* Autor para correspondencia: oprieto@uteq.edu.ec

Resumen

El presente trabajo explora los beneficios esenciales de las micorrizas arbusculares en técnicas de fitorremediación, resaltando su papel crucial en la descontaminación de suelos en Ecuador. El objetivo principal es realizar una revisión sistemática que sintetice la evidencia actual sobre la simbiosis entre plantas y micorrizas arbusculares. Se subraya la importancia crítica de estas asociaciones en la mejora de la eficiencia de la fitorremediación, destacando su impacto positivo en la absorción de contaminantes del suelo y en la promoción de la salud de las plantas. El análisis se centra en recopilar información de estudios relevantes

llevados a cabo en Ecuador y publicados en bases de datos bibliográficas de renombre como Scopus, Springerlink, Science Direct, Scielo, Google Académico, Redalyc y Francis and Taylor, proporcionando así una perspectiva específica y contextualizada. Los resultados sugieren que la integración de micorrizas arbusculares en estrategias de fitorremediación puede ser una herramienta valiosa para abordar los desafíos de la contaminación del suelo en la región. Al consolidar y analizar críticamente la información disponible, este trabajo contribuye significativamente al conocimiento científico, ofreciendo una visión integral de los beneficios de las micorrizas arbusculares en las técnicas de fitorremediación en el contexto ecuatoriano.

Palabras clave: Microorganismos benéficos, remediación de suelos, asociaciones simbióticas

Abstract

This study explores the essential benefits of arbuscular mycorrhizae in phytoremediation techniques, emphasizing their crucial role in soil decontamination in Ecuador. The main objective is to conduct a systematic review that synthesizes current evidence on the symbiotic relationship between plants and arbuscular mycorrhizae. The critical importance of these associations in enhancing phytoremediation efficiency is underscored, highlighting their positive impact on soil pollutant absorption and plant health promotion. The analysis focuses on gathering information from relevant studies conducted in Ecuador and published in reputable bibliographic databases such as Scopus, Springerlink, Science Direct, Scielo, Google Académico, Redalyc and Taylor and Francis, providing a specific and contextualized perspective. The results suggest that integrating arbuscular mycorrhizae into phytoremediation strategies can be a valuable tool in addressing soil contamination challenges in the region. By consolidating and critically analyzing available information, this work significantly contributes to scientific knowledge, offering a comprehensive understanding of the benefits of arbuscular mycorrhizae in phytoremediation techniques within the Ecuadorian context.

Keywords: beneficial microorganisms; soil remediation; symbiotic associations

Fecha de recibido: 02/10/2023

Fecha de aceptado: 12/11/2023

Fecha de publicado: 23/01/2024

Introducción

El suelo es fundamental para la agricultura, la ganadería y diversas actividades humanas. Cumple un papel crítico en el ambiente. La concentración de contaminantes en el suelo varía según las emisiones antropogénicas y los niveles de urbanización (Gautam *et al.*, 2023). Entre los contaminantes, los metales pesados y los hidrocarburos destacan como los más significativos, generando consecuencias negativas cuando se altera la capacidad natural del suelo para amortiguar, filtrar y transformar (Horta *et al.*, 2015). La minería, al liberar residuos con elementos tóxicos como plomo, mercurio y cadmio, se presenta como una de las

principales fuentes de contaminación. Asimismo, la actividad petrolera provoca una fuerte contaminación del suelo debido a los derrames de petróleo crudo y sus derivados (Rodríguez-González *et al.*, 2022).

En América Latina, la minería ha dejado impactos negativos en ríos, suelos y aire, generando una contaminación acumulada con graves repercusiones en la cultura local (Pérez y Betancourt, 2016). En Ecuador, proyectos mineros afectan la producción agrícola y dejan impactos desfavorables en el patrimonio natural, modificando paisajes y contaminando el agua (Massa-Sánchez *et al.*, 2018). La minería, en constante desarrollo en los últimos años, ha llevado a la deforestación en las zonas andinas, causando la lixiviación de mercurio en el suelo de la región e incrementando su flujo hacia las cuencas hidrográficas (Mora *et al.*, 2016). Además, las actividades mineras en la provincia de El Oro han generado impactos ambientales significativos, reduciendo las opciones para conservar la salud del medio ambiente (Prado y Lapo, 2023).

La industria petrolera, siendo la principal fuente de recursos en América Latina, ocasiona evidente contaminación ambiental en la Amazonía ecuatoriana y otras regiones (Rodríguez-González *et al.*, 2022). Martínez-Prado *et al.* (2021) señalan que el derrame de hidrocarburos es uno de los principales contaminantes del suelo. En Ecuador, la explotación petrolera a cargo de Petroecuador, ubicada en provincias como Sucumbíos, Orellana, Napo, Zamora Chinchipe y Pastaza, ha sido asociada con impactos negativos en la biodiversidad y derrames de petróleo que afectan la flora y fauna locales (Yáñez y Bárcenas, 2012). La producción de petróleo y las diversas fases de la actividad petrolera pueden afectar adversamente la biodiversidad a través de derrames de petróleo (Mateo y García, 2014). Para controlar y mitigar los efectos de los derrames de hidrocarburos, se requiere la elección de métodos adecuados según las características del sitio, como la topografía y las condiciones ambientales (Ortiz González *et al.*, 2006).

En los últimos 30 años, se han desarrollado diversas estrategias para la remediación de suelos a nivel mundial, destacando técnicas como electrorremediación, extracción forzada con vapores, oxidación química y landfarming (De La Rosa-Pérez *et al.*, 2007). Otra alternativa valiosa es la fitorremediación, que utiliza plantas y se presenta como una tecnología simple, rentable y ampliamente aceptada (Valencia *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2018; Ashraf *et al.*, 2019). La simbiosis entre las raíces de las plantas y los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) ha sido objeto de estudio, ya que estos hongos pueden mejorar la adquisición de nutrientes de las plantas en suelos con baja fertilidad (Rodrigues y Rodrigues, 2019). La fitorremediación asistida por HMA, al utilizar la capacidad de estas asociaciones para inmovilizar o eliminar contaminantes del suelo, se presenta como una alternativa efectiva y respetuosa con el medio ambiente (Rajtor y Piotrowska-Seget, 2016).

A pesar de la amplia información sobre HMA a nivel general en Ecuador, la aplicación específica de HMA como técnica de fitorremediación del suelo es un área poco explorada en el país (Garcés-Ruiz *et al.*, 2017). Los estudios existentes, principalmente provenientes de tesis de grado, se limitan a descripciones de comunidades de HMA en suelos contaminados por petróleo y minería (Garcés-Ruiz *et al.*, 2019). Aunque la información disponible es valiosa, la mayoría de las tesis no han sido revisadas por expertos ni publicadas en revistas científicas, limitando su utilidad para una revisión sistemática. Este trabajo busca consolidar y analizar críticamente la información disponible, contribuyendo así al conocimiento científico sobre la aplicación de micorrizas arbusculares en técnicas de fitorremediación en el contexto ecuatoriano.

Materiales y métodos

El presente trabajo se llevó a cabo entre julio y octubre de 2023 y se enmarca en una investigación documental descriptiva. La unidad de análisis consistió en artículos y tesis recopilados mediante una exhaustiva búsqueda bibliográfica sobre los beneficios de las micorrizas arbusculares en técnicas de fitorremediación para la descontaminación de suelos en Ecuador. Se emplearon términos clave como "hongos micorrízicos arbusculares," "micorrizas arbusculares," "fitorremediación," y "descontaminación de suelos en Ecuador" en español e inglés.

La búsqueda se realizó en siete bases de datos relevantes: Scopus, Springerlink, Science Direct, Scielo, Google Académico, Redalyc y Francis and Taylor, accesibles a través de la biblioteca digital de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Para llevar a cabo este estudio descriptivo mediante el análisis de documentos, se seleccionaron y extrajeron artículos teóricos o empíricos cuyos títulos indicaran un enfoque en el tema principal. Se confirmó la relevancia a través de la revisión de resúmenes, y en caso necesario, se consultaron los artículos completos. La decisión de inclusión se basó en la evaluación de la relación entre el contenido de los artículos y el objetivo del estudio. El análisis de documentos se centró en determinar si la información extraída estaba relacionada con los beneficios de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en las técnicas de fitorremediación de suelos en Ecuador. Este enfoque permitió identificar estudios pertinentes que abordaran de manera sustancial el tema de interés y proporcionaran resultados que contribuyeran al logro de los objetivos establecidos en la investigación.

Resultados y discusión

Micorrizas Arbusculares: Un Pilar Sustancial en la Sostenibilidad del Suelo

Las micorrizas arbusculares son relaciones mutualistas que se establecen entre un grupo de hongos ubicuos (pertenecientes al filo Glomeromycota) y la mayoría de las plantas (Cuenca et al., 2007). Según investigaciones de (Carrillo et al., 2022) los HMA son biotrofos obligados; es decir, requieren de la planta para completar su ciclo de vida y colonizan 80% de las plantas terrestres. La naturaleza simbiótica de las plantas con los HMA ha demostrado ser fundamental para la sostenibilidad de los ecosistemas, ya que son capaces de colonizar gran número de plantas terrestres (Díaz et al., 2014). Los HMA interactúan con el suelo, planta, patógenos u otros microorganismos del suelo, y a través de diferentes mecanismos mejoran la nutrición y sanidad de la planta (Díaz et al., 2014).

En las asociaciones simbióticas HMA, los hongos reciben carbono de la planta mientras que la planta recibe beneficios al explorar el suelo, como la capacidad para absorber agua y nutrientes minerales, además un mejor crecimiento y desarrollo (Martín y Rivera, 2005). La importancia ecológica de la relación de simbiosis HMA es especialmente destacable en ecosistemas donde las plantas son altamente tolerantes al estrés ambiental, principalmente gracias a la presencia de HMA (Usuga Osorio et al., 2008). Se conoce que estas relaciones simbióticas tienen efectos en la formación de la estructura del suelo, gracias a su papel en la creación de agregados estables al suelo, donde el micelio externo de las HMA desempeña un papel destacado (Cuenca et al., 2007) también, influyen en la producción de glomalina, la cual, debido a sus propiedades químicas, promueve la agregación de las partículas del suelo (Cuenca et al., 2007; Rillig, 2004).

Las micorrizas más abundantes y con una distribución amplia en el planeta son las ectomicorrizas y las arbusculares (Camarena, 2012). Las ectomicorrizas presentan un micelio que envuelve la raíz y forma un manto, mientras que las micorrizas arbusculares se caracteriza por la presencia de arbusculos (hifas finamente ramificadas que participan en el intercambio de nutrientes), intra o intercelular (Camarena, 2012). La colonización por hongos micorrízicos arbusculares fue mucho más pronunciada en las condiciones del suelo más pobres en fósforo (Gómez et al., 2007). La micorriza arbuscular se caracteriza por colonizar la mayor parte de plantas (herbáceas, árboles, y hepáticas, etc.), sólo se desarrollan cuando se asocian a las células vivas de sus hospedantes y son incapaces de nutrirse de células muertas, principalmente distribuye fósforo, se encuentran dentro de los Glomeromycota (Phyllum de hongos asociados) y tienen un tamaño microscópico (Carrillo et al., 2022).

En tanto al papel de los HMA en la nutrición de las plantas se basa en su capacidad de proporcionar nutrientes como el N y P (Rajtor y Piotrowska-Seget, 2016; Rodrigues y Rodrigues, 2019) y otros micronutrientes como K, Mg, Cu y Zn en suelos donde se encuentran en formas menos solubles (Nadeem et al., 2014), a cambio de un 4 al 20% del carbono fijado, dirigido a la MA. Otros beneficios para el huésped de los HMA incluyen una mayor resistencia al estrés biótico (infecciones de patógenos y herbivoría) y abiótico (sequías, salinidad, contaminación) (Messa y Savioli, 2021). A través de su extensa red micelial son capaces de interconectarse con especies de plantas individuales no relacionadas, fomentando la biodiversidad de un ecosistema (Rodrigues y Rodrigues, 2019).

Del mismo modo los HMA promueven el crecimiento del huésped por la producción de metabolitos (aminoácidos, vitaminas, fitohormonas) e incluso producen/acumulan metabolitos secundarios (Nadeem et al., 2014). Otra forma en la que intervienen en el crecimiento del huésped es a través de un mejor equilibrio hídrico al alterar el comportamiento de los estomas (Douds y Johnson, 2007). Esta simbiosis puede influir en el entorno microbiano y químico de la rizósfera debido a que induce cambios en la fisiología en el huésped que pueden intervenir en los patrones de exudación de la raíz y, en consecuencia, producir alteraciones en las poblaciones microbianas de la rizósfera (Gupta et al., 2017).

Por otra parte, los HMA representan un importante servicio ecosistémico (productividad sin perder propiedades físicas; reducir contaminantes y patógenos; entre otros) en el suelo para que cumpla su función de sostener la producción biológica y la calidad ambiental de este (Kahiluoto et al., 2009), donde las condiciones edáficas del sitio o lugar a estudiar (pH, humedad, distribución de flora y fauna) son extremas (Restrepo Giraldo et al., 2019). Esto conlleva a que su uso en la agricultura sea mayormente aceptado, ya que la asociación micorrízica juega un papel importante en la calidad del suelo (Lozano et al., 2015); por ejemplo, mediante la secreción de glomalina, sustancia proteica hidrofóbica secretada por las hifas fúngicas, en el suelo confiere una mayor estabilidad de este y aumenta la retención de agua disminuyendo el riesgo de erosión (Douds y Johnson, 2007).

La glomalina es reconocida como un compuesto glicoproteico abundante, casi ubicuo que exhibe una alta resistencia a temperaturas elevadas y puede ser producida por HMA, así nos explica Holátko et al. (2021). Con este mismo enfoque Douds y Johnson (2007), mencionan que esta glicoproteína parece tener un efecto en la capacidad de retención de humedad del suelo al disminuir la permeabilidad del agua en la superficie del suelo debido a un aumento en su resistencia al mojado. Esto se traduce en una menor velocidad de pérdida de agua y contribuye a un mejor mantenimiento de la humedad del suelo, de modo que contribuye a la retención

del agua. Las concentraciones totales de glomalina en el suelo están estrechamente relacionadas con las concentraciones de materia orgánica del suelo.

Fitorremediación: definición y técnicas empleadas

Los avances tecnológicos para ayudar a combatir ambientes contaminados por metales pesados han conducido al desarrollo de alternativas que se basan en el empleo de organismos vivos para prevenir o restaurar daños provocados por acciones antropogénicas que alteran la estabilidad de los diferentes ecosistemas (Marrero-Coto et al., 2012). La fitorremediación es una de las principales técnicas utilizadas en la descontaminación de suelos, ésta es un conjunto de tecnologías que ayuda a combatir la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas (Delgadillo López et al., 2011). Existen varias formas de fitorremediación aplicables a suelos contaminados con metales pesados: fitoextracción, fitoestabilización, fitodegradación, fitovolatilización, fitorrestauración (Marrero-Coto et al., 2012).

Aunado a lo anterior, la fitoextracción, también conocida como fitoacumulación, consiste en la absorción y translocación de los metales desde las raíces hasta las partes aéreas de las plantas; las cuales se cortan y se incineran o son acumuladas con el objetivo de reciclar los metales. (Marrero-Coto et al., 2012). La fitoestabilización se basa en la disminución de la biodisponibilidad y/o toxicidad del contaminante por su acumulación en raíces, incorporación a lignina o humus, o precipitación en la rizosfera (Peralta-Pérez et al., 2012). La fitodegradación y rizodegradación se refieren a la degradación de contaminantes orgánicos a través de las enzimas de las plantas, sus productos o por la acción de microorganismos rizosféricos (Marrero-Coto et al., 2012). La fitorrestauración está referida a la reforestación de áreas contaminadas con especies resistentes de rápido crecimiento, que previenen la migración de partículas contaminantes y la erosión de los suelos.

Importancia de la fitorremediación en la descontaminación de suelos contaminados

Los contaminantes (metales pesados, hidrocarburos, solventes orgánicos) que contienen los desechos liberados de las actividades antropogénicas pueden entrar directamente y/o por transferencia de un recurso ambiental hasta el suelo (Olguín et al., 2007). Para combatir la problemática las tecnologías convencionales que no son adecuadas para restaurar el suelo por sus limitaciones por barreras técnicas son costosas, requieren alto nivel de mano de obra, son invasivas y no son ecológicas y en búsqueda de técnicas con enfoques más sostenibles, aparece la fitorremediación; que aprovecha la capacidad de las plantas para acumular, metabolizar, extraer, volatilizar y/o estabilizar contaminantes presentes en agua, aire o especialmente en el suelo (Martínez et al., 2021).

Al mencionar fitorremediación nos referimos a una técnica aplicable en varios tratamientos de recuperación, no interfiere con el ecosistema, requiere menos mano de obra y es menos costosa que otros métodos tradicionales, por ejemplo: los métodos fisicoquímicos. Las plantas que se aplican poseen alta biomasa, de rápido crecimiento, un sistema extenso de raíces fibrosas, por último, sencillas de cultivar y cosechar (Oggero et al., 2021). Estas plantas pueden lidiar con altas concentraciones de sal y fitotóxicas de constituyentes metálicos. Además, esta técnica puede ser potenciada por combinaciones de estas mismas plantas con microorganismos de la rizósfera; por mencionar las asociaciones planta-endofíticas o rizosféricas (Kurade et al., 2021).

Descontaminación de suelos en Ecuador

En Ecuador, los estudios que abarquen la descontaminación de suelos son muy escasos. Las técnicas utilizadas en estudio para remediar suelos han sido muy efectivas, pero su alto costo en operación hace que sea insostenible (Chamba-Eras et al., 2022), y por lo tanto su aplicación llegaría a ser inviable en territorios más grandes y con contaminación mayor. Las técnicas in situ en el país han tenido un auge esta última década debido a la poca agresividad que presenta con el medio a estudiar (Caro, 2011).

Algunas investigaciones han demostrado, por ejemplo, que un grupo de plantas que crecen en sectores contaminados de la Amazonía por metales pesados (Au, Ag, Mg, etc) a causa de la minería pueden usarse como método de fitorremediación para la descontaminación del suelo (Chamba-Eras et al., 2022). Por otra parte, en la misma zona del país, se ha descubierto la presencia de bacterias y hongos que degradan el gasóleo (diesel), Maddela et al., (2015) determinaron en su estudio que algunos microorganismos (*Bacillus cereus*, *Bacillus thuringiensis*, *Geomyces pannorum*, *Geomyces sp*, etc) son capaces de degradar hidrocarburos, ya que estas contienen grandes fuentes de carbono (Maddela et al., 2015). Aun así, la información sobre descontaminación o recuperación del suelo por medio de la fitorremediación tanto para hidrocarburos como para metales pesados sigue siendo muy escasa en el país.

Contextualización del problema de la contaminación de suelos en Ecuador

De acuerdo con Massa-Sánchez et al. (2018), se ha encontrado que en el país los proyectos relacionados con la extracción y explotación de recursos minerales han concebido consecuencias negativas tanto para actividades de producción agrícola como para el patrimonio natural de comunidades locales. Estos proyectos amenazan la capacidad productiva del suelo, del mismo modo generan impactos adversos en los ecosistemas y recursos naturales cercanos. Las actividades que más destacan son la extracción minera y explotación petrolera en el país. De acuerdo con Maddela et al. (2015), el país es el quinto productor de petróleo en América Latina, siendo una de sus más importantes fuentes de ingresos y motor de la economía desde 1970.

En Ecuador, la producción de petróleo ha conducido al vertido de una gran cantidad de petróleo crudo al medio ambiente. Se han firmado permisos para extracción de petróleo en el Parque Nacional Yasuní, un área de 9820 km². Cabe mencionar, incluso, que el campo petrolero de Lago Agrio (Oriente ecuatoriano) es el más grande de la región amazónica, donde se generan y acumulan miles de toneladas de lodos aceitosos anualmente. Otra zona no solo influenciada por actividades de perforación y explotación de pozos petroleros sino también por el crecimiento poblacional, es la Reserva Biológica Limoncocha la cual está ubicada dentro del bloque 15 correspondiente a Petroamazonas, con tres campos de extracción de petróleo y un centro de producción (Carrillo et al., 2022).

En tanto a la extracción de minerales, las prácticas mineras en el distrito aledaño a las localidades de Portovelo y Zaruma en la provincia del Oro son las más grandes y antiguas de Ecuador (Vangsnes, 2018). En Portovelo-Zaruma prevalece la Minería Artesanal de Oro y en Pequeña Escala (siendo sus siglas en inglés, ASGM), esta actividad es considerada desde el 2018 por el Programa Ambiental de las Naciones Unidas como el mayor contribuyente antropogénico de mercurio (Hg) al ambiente (Schudel et al., 2019). De la población, se ven involucrados entre 6000 y 10.000 personas en actividades que abarcan la actividad de subsistencia aluvial y artesanal con inversión mínima, hasta la minería industrial subterránea de tamaño mediano, donde se procesan más de 1.000 toneladas de mineral diario (Vangsnes, 2018).

Estas prácticas utilizan variaciones de amalgamación de mercurio (Hg) y separación por gravedad, infraestructuras para el uso de lixiviación con cianuro de sodio (NaCN) y otros procesos químicos y mecánicos (Schudel et al., 2019). Se han contabilizado 87 plantas de procesamiento, de las cuales 78 cuentan con permisos legales para operación. No obstante, otras zonas como Ponce-Enríquez en Azuay o Nambija y Chinapintza en Zamora Chinchipe también llevan a cabo ASGM. En Chinapintza los impactos socioambientales son en gran parte resultado de la apropiación de la tierra por parte de los mineros artesanales, mayormente propietarios informales que por esta misma condición no se pueden permitir el uso de herramientas o equipos adecuados para garantizar los estándares de salud y seguridad al realizarlas (Sánchez-Vázquez et al., 2016).

Los resultados de los estudios sobre la aplicación de HMA en la fitorremediación de suelos contaminados en Ecuador revelan diversas especies de plantas utilizadas en procesos de recuperación ambiental. Estos estudios que se pueden observar en la Tabla 1, abarcan tanto artículos científicos como tesis de grado, contribuyen al conocimiento sobre la aplicación de micorrizas arbusculares en la fitorremediación de suelos contaminados en contextos específicos de Ecuador, proporcionando información valiosa para futuras prácticas de gestión ambiental.

Tabla 1. Estudios realizados sobre la aplicación de HMA en fitorremediación de suelos contaminados en Ecuador.

Estudio	Especie de planta	Contaminante	Referencia	Tipo de estudio
Selection of a Suitable Plant for Phytoremediation in Mining Artisanal Zones	Miconia zamorensis Axonopus compressus Erato polymnioides	Plomo (Pb) Zinc (Zn) Cobre (Cu) Cadmio (Cd)	(Chamba et al., 2016)	Artículo científico
Erato polymnioides - A novel Hg hyperaccumulator plant in ecuadorian rainforests acid soils with potential of microbe-associated phytoremediation	Erato polymnioides	Mercurio (Hg)	(Chamba et al., 2017)	Artículo científico
Degradación de hidrocarburos con hongos micorrízicos arbusculares Rhizophagus irregularis y una cepa nativa proveniente de la Amazonía Ecuatoriana asociados a pasto RyeGrass (Lolium multiflorum)	Lolium multiflorum	Petróleo	(Mogrovejo, 2019)	Tesis de Grado
Análisis descriptivo del Helianthus annuus y Zea mays como acumuladores de (Cd, Pb) para la recuperación de suelos agrícolas contaminados	Helianthus annuus Zea mays	Cadmio (Cd) Plomo (Pb)	(Jiménez, 2023)	Tesis de Grado

Beneficios de las micorrizas arbusculares en la fitorremediación

Como puede observarse en la Figura 1, las micorrizas arbusculares tienen la capacidad de cambiar la disponibilidad de los metales pesados, aumentar la movilidad de los metales pesados hacia las raíces y la capacidad de acumulación y fijación de estas (Liu et al., 2020). Todos estos efectos se pueden describir, según Liu et al. (2020), de la siguiente manera: los metales pesados ingresan a las paredes celulares y vacuolas de las plantas, quedando separados en ambas partes. Los metales pesados son transportados al citoplasma a través de transportadores de membrana plasmática. Dentro de sus células, los iones de metales pesados son quelados por fitoquelatinas, glutationes y metalotioneínas.

De acuerdo con Carrenho et al. (2018) las membranas de las células vegetales poseen varios transportadores responsables de ingresar metales pesados en el citosol, así como otras proteínas transportadoras en la biogénesis de ATP de cloroplastos, facilitadores de la difusión de cationes y ferreportinas, que participan en la eliminación de metales del citosol y su transporte a través del xilema. De esta forma los HMA son capaces de mantener las concentraciones de los metales en homeostasis dentro de las células vegetales aumentando la absorción y las concentraciones de metales en los tejidos vegetales, así reducen las contracciones en el suelo.

Por otro lado, las hifas de los HMA interactúan con las raíces de las plantas para limitar la migración de metales pesados desde el suelo hasta las raíces y los tallos, restringiendo así la circulación de estos metales pesados al suelo. La movilidad reducida de los metales pesados desde las raíces hasta los tallos se debe principalmente a la pared celular, que es el sitio principal donde ocurre la quelación de metales pesados en las plantas. Es decir, los metales pesados se quedan durante su transporte desde las raíces hasta los tallos, y se fijan en las paredes celulares de varios tejidos vegetales, lo que disminuye la concentración de metales pesados fijados en el suelo (figura 1). Del mismo modo, Carrenho et al. (2018) mencionan que estas hifas no solo secretan sustancias que actúan sobre la quelación de los metales, incluso liberan ácidos orgánicos que pueden favorecer la solubilización de estos facilitando la absorción.

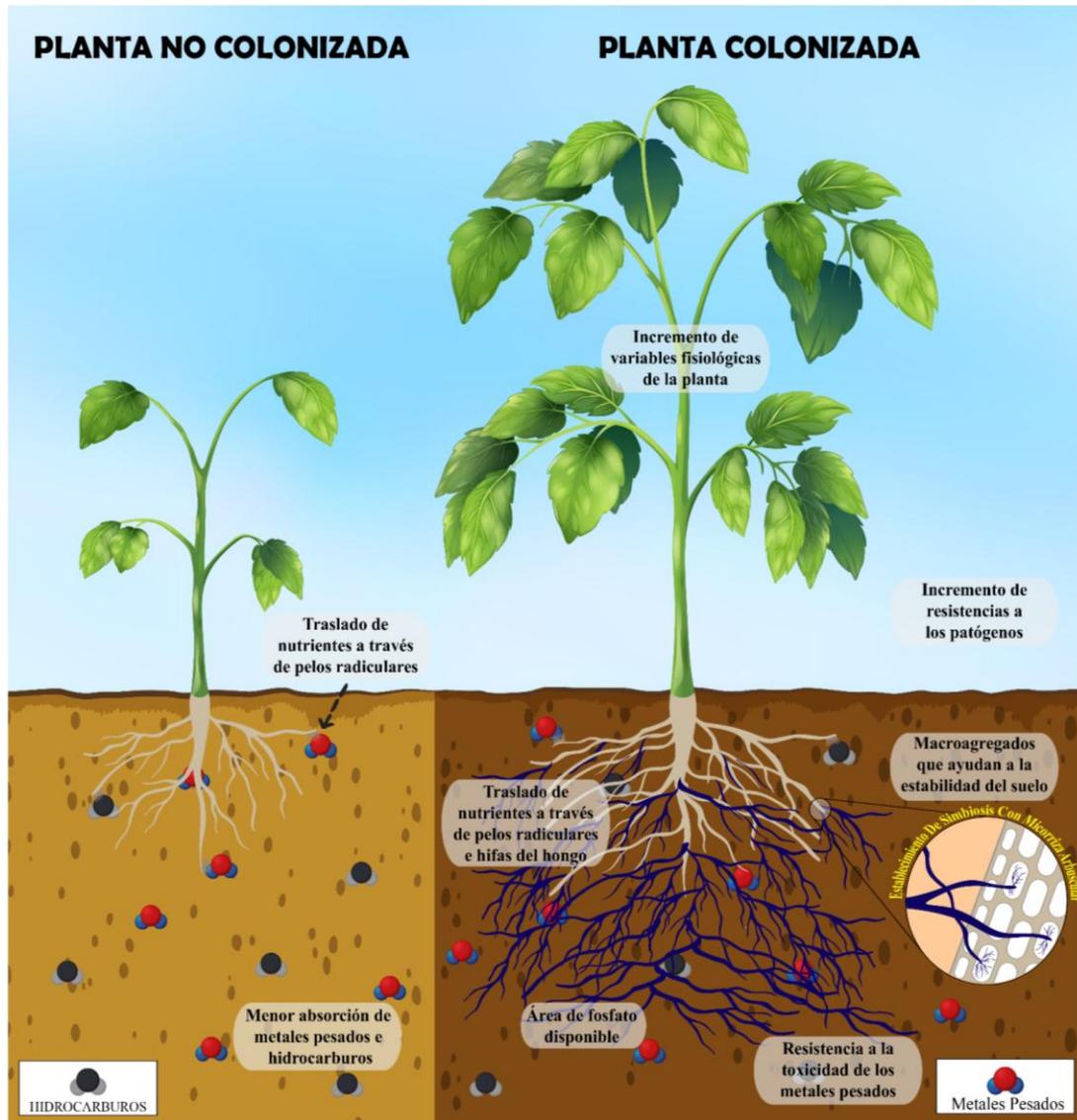


Figura 1. Beneficios de los hongos micorrízicos arbusculares en suelos contaminados por metales pesados e hidrocarburos.

Conclusiones

La presente revisión bibliográfica ha proporcionado una visión integral de los beneficios de las micorrizas arbusculares en las técnicas de fitorremediación para la descontaminación de suelos en Ecuador. Se destaca la importancia de la simbiosis entre las plantas y los HMA, subrayando su papel crucial en la mejora de la eficiencia de la fitorremediación.

Los estudios revisados evidencian la capacidad de diversas especies de plantas, como *Miconia zamorensis*, *Axonopus compressus*, y *Erato polymnioides*, para la fitoextracción de metales pesados como plomo, zinc, cobre y cadmio. Además, se identificó a *Erato polymnioides* como una planta hiperacumuladora de mercurio en suelos ácidos de bosques ecuatorianos, revelando su potencial en la fitorremediación de este contaminante.

La asociación de hongos micorrízicos arbusculares, especialmente *Rhizophagus irregularis*, con plantas como *Lolium multiflorum*, ha demostrado ser eficaz en la degradación de hidrocarburos presentes en suelos contaminados con petróleo. Asimismo, se ha explorado el papel de plantas como *Helianthus annuus* y *Zea mays* en la acumulación de metales pesados, como cadmio y plomo, para la recuperación de suelos agrícolas contaminados.

Estos hallazgos resaltan el potencial de los HMA en la mejora de la salud del suelo, la absorción de contaminantes y la promoción del crecimiento vegetal. La información recopilada contribuye significativamente al conocimiento científico sobre la aplicación de los HMA en estrategias de fitorremediación, ofreciendo una perspectiva específica y contextualizada para abordar los desafíos de la contaminación del suelo en el contexto ecuatoriano. Este trabajo consolida y analiza críticamente la evidencia disponible, destacando la relevancia de considerar las asociaciones simbióticas de las MA como herramientas valiosas en la gestión ambiental y la recuperación de suelos contaminados.

Referencias

- Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S., y Asghar, H. N. (2019). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174, 714-727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
- Camarena, G. (2012). Interacción planta-hongos micorrízicos arbusculares. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(3), 409-421.
- Caro, D. (2011). Fitorremediación de suelos contaminados con pesticidas. *MoleQla*, 55-56.
- Carrenho, R., De J. Alves, L., y Santos, I. d. S. (2018). Chapter 15 - Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Interactions With Heavy Metals and Rehabilitation of Abandoned Mine Lands. *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00015-4>
- Carrillo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., y Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta botánica mexicana*, (129).
- Chamba, I., Gazquez, M. J., Selvaraj, T., Calva, J., Toledo, J. J., y Armijos, C. (2016). Selection of a Suitable Plant for Phytoremediation in Mining Artisanal Zones. *International Journal of Phytoremediation*. <http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2016.1156638>
- Chamba, I., Rosado, D., Kalinhoff, C., Thangaswamy, S., Sánchez-Rodríguez, A., y Gazquez, M. J. (2017). *Erato polymnioides* - A novel Hg hyperaccumulator plant in ecuadorian rainforests acid soils with potential of microbe-associated phytoremediation. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.160>

- Chamba-Eras, I., Griffith, D. M., Kalinhoff, C., Ramírez, J., y Gázquez, M. J. (2022). Native Hyperaccumulator Plants with Differential Phytoremediation Potential in an Artisanal Gold Mine of the Ecuadorian Amazon. *Plants*, 11. <https://doi.org/10.3390/plants11091186>
- Cuenca, G., Cáceres, A., Oirdobro, G., Hasmy, Z., y Urdaneta, C. (2007). Las micorrizas arbusculares como alternativa para una agricultura sustentable en áreas tropicales. *Interciencia*, 32(1), 23-29.
- De La Rosa-Pérez, D. A., Teutli-León, M., y Ramírez-Islas, M. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*, 23(3), 129-138.
- Delgadillo-López, A. E., Gonzáles-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Villagomez-Ibarra, J. R., y Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 597-612.
- Díaz, A., Salinas García, J. R., Espinosa Sandoval, F., Peña del Río, M. D. L. Á., Requena, F. R., y Grageda Cabrera, O. A. (2014). Características de planta, suelo y productividad entre sorgo fertilizado e inoculado con micorriza arbuscular. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(3), 379-390.
- Douds, D. D., y Johnson, N. C. (2007). Contributions of Arbuscular Mycorrhizas to Soil Biological Fertility. *Soil Biological Fertility*, 129-162. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6619-1_7
- Garcés-Ruiz, M., Senés-Guerrero, C., Declerck, S., y Cranenbrouck, S. (2017). Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community Composition in *Carludovica palmata*, *Costus scaber* and *Euterpe precatoria* from Weathered Oil Ponds in the Ecuadorian Amazon. *Frontiers in Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02134>
- Garcés-Ruiz, M., Senés-Guerrero, C., Declerck, S., y Cranenbrouck, S. (2019). Community composition of arbuscular mycorrhizal fungi associated with native plants growing in a petroleum-polluted soil of the Amazon region of Ecuador. *MicrobiologyOpen*, 8(4), e00703. <https://doi.org/10.1002/mbo3.703>
- Gautam, K., Sharma, P., Dwivedi, S., Singh, A., Gaur, V. K., Varjani, S., ... y Ngo, H. H. (2023). A review on control and abatement of soil pollution by heavy metals: Emphasis on artificial intelligence in recovery of contaminated soil. *Environmental Research*, 115592.
- Gómez, L. I. A., Portugal, V. O., Arriaga, M. R., y Alonso, R. C. (2007). Micorrizas arbusculares. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 14(3), 300-306.
- Gupta, R. M., Hadaya, J., Trehan, A., Zekavat, S. M., Roselli, C., Klarin, D., ... y Kathiresan, S. (2017). A genetic variant associated with five vascular diseases is a distal regulator of endothelin-1 gene expression. *Cell*, 170(3), 522-533.
- Holátko, J., Brtnický, M., Kučerík, J., Kotianová, M., Elbl, J., Kintl, A., ... y Jansa, J. (2021). Glomalin—Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein. *Soil Biology and Biochemistry*, 153, 108116.

- Horta, A., Malone, B., Stockmann, U., Minasny, B., Bishop, T. F. A., McBratney, A. B., ... y Pozza, L. (2015). Potential of integrated field spectroscopy and spatial analysis for enhanced assessment of soil contamination: A prospective review. *Geoderma*, 241, 180-209.
- Jiménez, M. (2020). Análisis descriptivo del *Helianthus annuus* y *Zea mays* como acumuladores de (Cd, Pb) para la recuperación de suelos agrícolas contaminados (Tesis Doctoral, Universidad Agraria del Ecuador).
- Kahiluoto, H., Ketoja, E., y Vestberg, M. (2009). Contribution of arbuscular mycorrhiza to soil quality in contrasting cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.05.016>
- Kurade, M. B., Ha, Y. H., Xiong, J. Q., Govindwar, S. P., Jang, M., y Jeon, B. H. (2021). Phytoremediation as a green biotechnology tool for emerging environmental pollution: a step forward towards sustainable rehabilitation of the environment. *Chemical Engineering Journal*, 415, 129040.
- Liu, L., Li, W., Song, W., y Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of The Total Environment*, 633, 206-219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- Liu, S., Yang, B., Xiao, Y., y Fang, J. (2020). Prospect of phytoremediation combined with other approaches for remediation of heavy metal-polluted soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 27. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08282-6>
- Lozano, J. D., Armbricht, I., y Montoya Lerma, J. (2015). Hongos formadores de micorrizas arbusculares y su efecto sobre la estructura de los suelos en fincas con manejos agroecológicos e intensivos. *Acta Agronómica*. <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n4.46045>
- Maddela, N. R., Masabanda, M., y Leiva-Mora, M. (2015). Novel diesel-oil-degrading bacteria and fungi from the Ecuadorian Amazon rainforest. *Water Science y Technology*. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.142>
- Marrero-Coto, J., Amores-Sánchez, I., y Coto-Pérez, O. (2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 46(3), 52-61.
- Martín, G. M., y Rivera, R. (2015). Influencia de la inoculación micorrízica en los abonos verdes. Efecto sobre el cultivo principal. Estudio de caso: el maíz. *Cultivos tropicales*, 36, 34-50.
- Martínez, L., Sarmiento-Sarmiento, G., y Bocardo-Delgado, E. (2021). Especies vegetales nativas con potencial para la fitorremediación de suelos alto andinos contaminados por residuos de actividad minera. *Bioagro*, 33(3), 161-170.
- Martínez-Prado, A., Pérez-López, M. E., Pinto-Espinoza, J., Gurrola-Nevárez, B. A., y Osorio-Rodríguez, A. L. (2021). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(3), 241-252.

- Massa-Sánchez, P., Cisne Arcos, R. D., y Maldonado, D. (2018). Minería a gran escala y conflictos sociales: un análisis para el sur de Ecuador. *Problemas del desarrollo*, 49(194), 119-141.
- Mateo, J. P., y García, S. (2014). El sector petrolero en Ecuador. 2000-2010. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 45(177), 113-139.
- Messa, V., y Savioli, M. (2021). Improving sustainable agriculture with arbuscular mycorrhizae. *Rhizosphere*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100412>
- Mogrovejo Arias, M. P. (2019). Degradación de hidrocarburos con hongos micorrízicos arbusculares *Rhizophagus irregularis* y una cepa nativa proveniente de la Amazonía Ecuatoriana asociados a pasto RyeGrass (*Lolium multiflorum*) (Bachelor's thesis, PUCE-Quito).
- Mora, A., Jumbo-Flores, D., González-Merizalde, M., y Bermeo-Flores, S. A. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río Puyango, Ecuador. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(4), 385-397.
- Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A., y Ashraf, M. (2014). The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnology Advances*, 32, 429-448. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.12.005>
- Oggero, A. S., Nakayama, H. D., Ávalos, C. R., Garcia, I. C., Benítez, J. V., Ayala, J., ... y Peralta, I. (2021). Eficiencia de la absorción de cobre (Cu) y cromo (Cr), una propuesta de fitorremediación de efluentes mediada por *Typha domingensis*. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 26(2), 100-113.
- Olguín, E. J., Hernández, M. E., y Sánchez-Galván, G. (2007). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 23(3), 139-154.
- Ortiz González, D. P., Andrade Fonseca, F., Rodríguez Niño, G., y Montenegro Ruiz, L. C. (2006). Biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua. *Ingeniería e Investigación*, 26(2), 20-27.
- Peralta-Pérez, M. D. R., y Volke-Sepúlveda, T. L. (2012). La defensa antioxidante en las plantas: una herramienta clave para la fitorremediación. *Revista mexicana de ingeniería química*, 11(1), 75-88.
- Pérez O, M. M., y Betancourt V, A. (2016). Impactos ocasionados por el desarrollo de la actividad minera al entorno natural y situación actual de Colombia. *Sociedad y Ambiente*, (10), 95-112.
- Pérez-Martínez, I., y Romero, F. (2015). Uso de parámetros indirectos para la evaluación de la contaminación de suelos por metales pesados en una zona minera de San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(1), 01-12.
- Prado, F. J., y Lapo, J. S. (2023). Análisis de afectación al patrimonio inmueble de Zaruma por causas de explotación minera ilegal y sus efectos en el turismo: Análisis de afectación al patrimonio inmueble de Zaruma por causas de explotación minera ilegal y sus efectos en el turismo. *593 Digital Publisher CEIT*, 8(1), 44-60.

- Rajtor, M., y Piotrowska-Seget, Z. (2016). Prospects for arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to assist in phytoremediation of soil hydrocarbon contaminants. *Chemosphere*, 162, 105-116. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.071>
- Restrepo Giraldo, K. J., Montoya Correa, M. I., Jaramillo, P. H., Gutiérrez, L. A., y Molina Guzmán, L. P. (2019). Caracterización de hongos micorrízicos arbusculares de suelos ganaderos del trópico alto y trópico bajo en Antioquia, Colombia. *IDESIA*, 37(1), 35-44. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019005000301>
- Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, 84(4), 355-363.
- Rodrigues, K., y Rodrigues, B. F. (2019). Arbuscular Mycorrhizae: Natural Ecological Engineers for Agro-Ecosystem Sustainability. *Microbial Biotechnology in Agro-Environmental Sustainability*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64191-5.00012-2>
- Rodríguez-González, A., Zárate-Villarroe, S. G., y Bastida-Codina, A. (2022). Biodiversidad bacteriana presente en suelos contaminados con hidrocarburos para realizar biorremediación. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(1), 178-208.
- Sánchez-Vázquez, L., Espinoza-Quezada, M. G., y Eguiguren-Riofrío, M. B. (2016). “Golden reality” or the “reality of gold”: Artisanal mining and socio-environmental conflict in Chinapintza, Ecuador. “Golden reality” or the “reality of gold”: Artisanal mining and socio-environmental conflict in Chinapintza, Ecuador, 3. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2015.11.004>
- Schudel, G., Kaplan, R., Miserendino, R. A., Veiga, M. M., Colon Velazquez-López, P., Davée Guimarães, J. R., y Bergquist, B. A. (2019). Mercury isotopic signatures of tailings from artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in southwestern Ecuador. *Mercury isotopic signatures of tailings from artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in southwestern Ecuador*, 686. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.004>
- Usuga Osorio, C. E., Castañeda Sánchez, D. A., y Franco Molano, A. E. (2008). Multiplicación de hongos micorriza arbuscular (HMA) y efecto de la micorrización en plantas micropropagadas de banano (Musa AAA cv. Gran Enano) (Musaceae). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 61(1), 4279-4290.
- Valencia, I. H., Navas, G. A. A., y Infante, C. (2017). Fitorremediación de un suelo contaminado con petróleo extrapesado con *Megathyrus maximus*. *Revista Internacional De Contaminacion Ambiental*. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.12>
- Vangsnes, G. F. (2018). The meanings of mining: A perspective on the regulation of artisanal and small-scale gold mining in southern Ecuador. *The Extractive Industries and Society*, 5(2), 317-326.
- Velásquez García, J. J., y Cobeña Navarrete, H. M. (2022). Fitorremediación como alternativa en remoción de metales pesados del suelo: Una revisión teórica. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 9(2).

Yáñez, P., y Bárcenas, M. (2012). Determinación de los niveles de tolerancia a hidrocarburos y potencial de fitorremediación de cuatro especies vegetales del sector Baeza-El Chaco, Ecuador. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 15(1), 27-48.