

## **Rendimiento y contenido de nitrógeno del helecho *Azolla filiculoides* mediante el uso de diferentes bases nutritivas para su propagación**

### **Yield and nitrogen content of the fern *Azolla filiculoides* using different nutrient bases for its propagation**

*Diego Javier Nevárez Pérez*<sup>1</sup>

*Liz Sabrina Trueba Macias*<sup>2</sup>

*María Gabriela Farías Delgado*<sup>3</sup>

#### **Resumen**

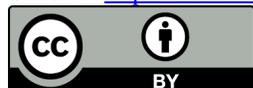
Este artículo explora el potencial del helecho acuático *Azolla filiculoides* como biofertilizante, enfocándose en la optimización de su producción a través de bases nutritivas orgánicas y su valor educativo para promover la sostenibilidad ambiental. Se parte de la problemática del uso excesivo de fertilizantes químicos nitrogenados y la necesidad de alternativas sostenibles en la agricultura. Se realizó un experimento utilizando gallinaza y estiércol bovino compostados en diferentes dosis para evaluar su efecto sobre el rendimiento de la biomasa de *Azolla filiculoides*. Los resultados demuestran que la gallinaza a una dosis de 0.60 kg/m<sup>2</sup> generó el mayor rendimiento, superando significativamente a los demás tratamientos. El análisis de la biomasa confirmó su alto contenido nutricional, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio. Este estudio resalta la capacidad de la *Azolla* para mejorar la calidad del agua residual, actuando como un filtro biológico que reduce la salinidad y absorbe nutrientes. Se destaca su potencial educativo como modelo pedagógico para abordar la ecología, biología, química y agricultura sostenible. Se

---

<sup>1</sup> Ingeniero Agrónomo. Magíster en Economía y Administración Agrícola. Docente de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Ecuador. E-mail: [diego.nevarez@uleam.edu.ec](mailto:diego.nevarez@uleam.edu.ec) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0336-2862>

<sup>2</sup> Magíster. Docente de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Ecuador. E-mail: [liz.trueba@uleam.edu.ec](mailto:liz.trueba@uleam.edu.ec) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9075-1064>

<sup>3</sup> Magíster. Docente de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. Ecuador. E-mail: [maria.farias@uleam.edu.ec](mailto:maria.farias@uleam.edu.ec) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8675-6535>



sugieren aplicaciones como la implementación de sistemas de acuaponía a pequeña escala, experimentación con variables que afectan su crecimiento e investigación sobre sus usos tradicionales. Se concluye que la Azolla filiculoides es una herramienta valiosa para la construcción de sistemas agrícolas sostenibles y para la formación de ciudadanos responsables con el medio ambiente. Se recomienda continuar investigando sus aplicaciones en diferentes contextos agroecológicos y promover su incorporación en la educación ambiental.

*Palabras clave:* Azolla, nitrógeno, biofertilizantes

### **Abstract**

This article explores the potential of the aquatic fern *Azolla filiculoides* as a biofertilizer, focusing on the optimization of its production through organic nutritional bases and its educational value to promote environmental sustainability. It is based on the problem of the excessive use of nitrogenous chemical fertilizers and the need for sustainable alternatives in agriculture. An experiment was conducted using composted poultry manure and bovine manure at different doses to evaluate their effect on the biomass yield of *Azolla filiculoides*. The results show that poultry manure at a dose of 0.60 kg/m<sup>2</sup> generated the highest yield, significantly outperforming the other treatments. Biomass analysis confirmed its high nutritional content, especially nitrogen, phosphorus and potassium. This study highlights the capacity of *Azolla* to improve the quality of wastewater, acting as a biological filter that reduces salinity and absorbs nutrients. Its educational potential as a pedagogical model to address ecology, biology, chemistry and sustainable agriculture is highlighted. Applications such as the implementation of small-scale aquaponics systems, experimentation with variables that affect its growth and research on its traditional uses are suggested. It is concluded that *Azolla filiculoides* is a valuable tool for the construction of sustainable agricultural systems and for the formation of environmentally

responsible citizens. It is recommended to continue investigating its applications in different agroecological contexts and to promote its incorporation in environmental education.

*Keywords:* Azolla, nitrogen, biofertilizers

### **Introducción**

En un contexto global marcado por la creciente preocupación por la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria, la búsqueda de alternativas a las prácticas agrícolas convencionales se ha convertido en una prioridad. El uso excesivo de fertilizantes químicos nitrogenados, si bien ha impulsado la productividad agrícola en las últimas décadas, ha generado una serie de impactos negativos en el medio ambiente (Berru Garcia, 2023; Fuentes Quijandria, 2023). Entre estos impactos, destacan la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, la eutrofización de ecosistemas acuáticos, la emisión de gases de efecto invernadero y la degradación de la calidad del suelo.

En este sentido, la comunidad científica ha intensificado la investigación en torno a biofertilizantes, como una alternativa viable para reducir la dependencia de los fertilizantes sintéticos y promover sistemas de producción agrícola más sostenibles (Ayala Herrería, 2024). En este marco, el helecho acuático *Azolla filiculoides* ha emergido como un candidato prometedor, debido a su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico a través de una simbiosis con la cianobacteria *Anabaena azollae* (Valle Acaro, 2024). Esta simbiosis permite a la *Azolla* crecer rápidamente en ambientes acuáticos con bajo contenido de nitrógeno, convirtiéndola en una fuente natural de este nutriente esencial para las plantas.

El uso de *Azolla* como biofertilizante no es un descubrimiento reciente. Diversas culturas ancestrales, particularmente en Asia, han aprovechado las propiedades de esta planta para enriquecer la fertilidad del suelo y aumentar la producción de arroz (Valle Acaro, 2024). Sin

embargo, en las últimas décadas, el interés por la *Azolla* ha trascendido el ámbito de la agricultura tradicional para posicionarse como un tema de investigación con potencial para abordar problemáticas contemporáneas como la seguridad alimentaria, la mitigación del cambio climático y la educación ambiental (Lokazyuk, 2023).

La presente investigación se enmarca en la necesidad de explorar alternativas sostenibles a la fertilización química en la agricultura, con un enfoque que integra la investigación científica con la educación ambiental. Si bien existe un creciente cuerpo de investigación sobre la *Azolla* como biofertilizante, aún persisten vacíos de conocimiento en cuanto a la optimización de su producción y su aplicación en diferentes contextos agroecológicos.

En este sentido, este estudio se centra en evaluar la eficiencia de diferentes bases nutritivas orgánicas para la propagación de *Azolla filiculoides*, con el objetivo de identificar estrategias de bajo costo y fácil implementación para su producción a pequeña y mediana escala. La elección de la gallinaza y el estiércol bovino como bases nutritivas se fundamenta en su amplia disponibilidad como subproductos de la actividad agropecuaria, lo que representa una oportunidad para su revalorización y su integración en sistemas de producción circular.

Asimismo, este trabajo busca contribuir a la construcción de una cultura de sostenibilidad ambiental en el ámbito educativo, al promover la investigación y la experimentación en torno a soluciones basadas en la naturaleza. La *Azolla*, por sus características biológicas y su fácil manejo, se presenta como un modelo ideal para el aprendizaje práctico de conceptos relacionados con la ecología, la biología, la química y la agricultura sostenible. La experiencia de cultivar *Azolla* y observar su interacción con el ambiente puede fomentar en los estudiantes el pensamiento crítico, la creatividad y la responsabilidad ambiental.

### **Revisión de la literatura**

### **Fertilizantes nitrogenados: Impactos ambientales y alternativas sostenibles**

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, desempeñando un papel fundamental en la síntesis de proteínas, clorofila y ácidos nucleicos (Montiel León, 2024; Muñoz Muñoz, 2024). Si bien el nitrógeno es el elemento más abundante en la atmósfera, se encuentra en una forma química ( $N_2$ ) que no es directamente asimilable por la mayoría de las plantas (Lihuisi Juarez, 2023). Para que el nitrógeno atmosférico pueda ser utilizado por las plantas, debe ser transformado en formas químicas disponibles (Lloret Pastor, 2022), como el amonio ( $NH_4^+$ ) y el nitrato ( $NO_3^-$ ), a través de un proceso denominado fijación biológica de nitrógeno (FBN).

La FBN es llevada a cabo por microorganismos, principalmente bacterias, que tienen la capacidad de convertir el nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) en amonio ( $NH_4^+$ ), a través de la acción de la enzima nitrogenasa (Celis Rodriguez, 2021). Algunos de estos microorganismos fijadores de nitrógeno viven en simbiosis con las plantas, formando nódulos en sus raíces, como es el caso de las leguminosas. Otros microorganismos fijadores de nitrógeno son de vida libre en el suelo o en el agua.

La agricultura moderna se ha basado en gran medida en el uso de fertilizantes químicos nitrogenados para suplir las necesidades de nitrógeno de los cultivos, lo que ha permitido aumentar significativamente la producción de alimentos (Bunch, 2020). Sin embargo, la producción, transporte y aplicación de estos fertilizantes sintéticos tienen un alto costo energético y generan importantes impactos ambientales, que amenazan la sostenibilidad de los agroecosistemas.

### ***Impactos ambientales de los fertilizantes nitrogenados sintéticos***

La producción de fertilizantes nitrogenados sintéticos, como la urea y el nitrato de amonio, requiere grandes cantidades de energía, principalmente proveniente de combustibles fósiles (Grimi, 2020). Se estima que la producción de fertilizantes nitrogenados es responsable de aproximadamente el 1-2% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero.

La aplicación excesiva o inadecuada de fertilizantes nitrogenados puede provocar la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, a través de un proceso conocido como lixiviación (Briones Morales et al, 2021). La lixiviación se produce cuando los nutrientes, en este caso el nitrógeno, no son absorbidos por las plantas y se filtran a través del suelo, alcanzando las fuentes de agua. La presencia de altas concentraciones de nitratos en el agua potable puede tener efectos negativos en la salud humana, especialmente en niños, causando metahemoglobinemia, una enfermedad que afecta el transporte de oxígeno en la sangre.

La contaminación por nitratos también afecta la calidad de las aguas superficiales, como ríos, lagos y océanos (Dorado Guerra, 2024). El exceso de nutrientes en estos ecosistemas acuáticos puede provocar un crecimiento descontrolado de algas, un fenómeno conocido como eutrofización. La proliferación de algas puede agotar el oxígeno disuelto en el agua, afectando la supervivencia de otras especies acuáticas, como peces y moluscos.

#### ***Alternativas sostenibles: Biofertilizantes***

La búsqueda de alternativas sostenibles a los fertilizantes nitrogenados sintéticos ha cobrado gran relevancia en las últimas décadas. Entre estas alternativas, destacan los biofertilizantes, que se definen como productos que contienen microorganismos vivos o sus metabolitos, que al ser aplicados a las plantas o al suelo, promueven el crecimiento vegetal al aumentar la disponibilidad o la absorción de nutrientes (Díaz-Gutiérrez et al., 2022).

Los biofertilizantes presentan ventajas significativas frente a los fertilizantes químicos, entre las que destacan:

- **Bajo impacto ambiental:** Su producción y aplicación generan un menor impacto ambiental, al reducir la dependencia de combustibles fósiles y minimizar la contaminación por nitratos.
- **Mejora de la calidad del suelo:** Los biofertilizantes no solo aportan nutrientes, sino que también mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, al promover la actividad microbiana y la formación de materia orgánica.
- **Mayor eficiencia en el uso de nutrientes:** Los microorganismos presentes en los biofertilizantes ayudan a las plantas a absorber los nutrientes de forma más eficiente, reduciendo las pérdidas por lixiviación.

#### **El helecho acuático *Azolla filiculoides*: Un biofertilizante con potencial**

El helecho acuático *Azolla filiculoides* es una planta flotante de agua dulce que se caracteriza por su pequeño tamaño, su rápido crecimiento y su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico a través de una simbiosis con la cianobacteria *Anabaena azollae*. Esta simbiosis le confiere a la *Azolla* la capacidad de crecer en ambientes acuáticos con bajo contenido de nitrógeno, convirtiéndola en una fuente natural de este nutriente esencial para las plantas.

#### ***Características biológicas de la Azolla filiculoides***

La *Azolla filiculoides* es una planta pteridofita, perteneciente a la familia Salviniaceae. Es una planta acuática flotante, de tamaño pequeño (1-2,5 cm de longitud), con hojas imbricadas dispuestas en dos filas a lo largo del tallo. Las hojas presentan una cavidad dorsal que alberga a la cianobacteria simbiote *Anabaena azollae*.

La reproducción de la *Azolla* puede ser sexual, a través de esporas, o asexual, por fragmentación vegetativa. La reproducción asexual es la más común, lo que le permite a la planta multiplicarse rápidamente en condiciones favorables, duplicando su biomasa en 3-5 días.

#### ***Simbiosis Azolla-Anabaena: Fijación biológica de nitrógeno***

La simbiosis entre la *Azolla filiculoides* y la cianobacteria *Anabaena azollae* es un ejemplo notable de mutualismo, en el que ambas especies se benefician de la interacción. La *Anabaena azollae* es una cianobacteria filamentosa que posee la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico (N<sub>2</sub>) a través de la acción de la enzima nitrogenasa. Esta enzima es sensible a la presencia de oxígeno, por lo que la *Anabaena* ha desarrollado mecanismos para protegerla, como la formación de heterocistos, células especializadas en la fijación de nitrógeno.

La *Azolla*, por su parte, proporciona a la *Anabaena* un ambiente protegido de la luz solar directa y una fuente constante de carbono orgánico, producto de la fotosíntesis. A cambio, la *Anabaena* suministra a la *Azolla* el nitrógeno fijado en forma de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), que la planta utiliza para su crecimiento y desarrollo.

Se estima que la *Azolla* puede fijar entre 100 y 300 kg de nitrógeno por hectárea al año, lo que la convierte en una fuente importante de este nutriente para los sistemas agrícolas.

#### ***Usos de la Azolla filiculoides en la agricultura***

La *Azolla filiculoides* ha sido utilizada como biofertilizante en la agricultura durante siglos, especialmente en el cultivo de arroz en Asia. Su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, su rápido crecimiento y su fácil manejo la convierten en una alternativa sostenible a los fertilizantes nitrogenados sintéticos.

La *Azolla* puede ser utilizada como biofertilizante de diferentes maneras:

- **Cultivo intercalado en arrozales:** La *Azolla* se cultiva en los arrozales junto con el arroz, aprovechando el agua y los nutrientes del cultivo principal. A medida que la *Azolla* crece, fija nitrógeno atmosférico y lo libera al agua a través de la descomposición de sus hojas y raíces. De esta manera, el arroz se beneficia del nitrógeno fijado por la *Azolla*, reduciendo la necesidad de aplicar fertilizantes químicos.

- **Incorporación al suelo como abono verde:** La *Azolla* puede ser incorporada al suelo como abono verde, aportando materia orgánica y nutrientes al cultivo siguiente. La descomposición de la *Azolla* en el suelo libera nitrógeno, fósforo y otros nutrientes, que pueden ser absorbidos por las plantas.

- **Producción de biogás:** La *Azolla* también puede ser utilizada para la producción de biogás, una fuente de energía renovable. La fermentación anaerobia de la *Azolla* produce biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono.

#### ***Potencial de la Azolla filiculoides en la educación ambiental***

La *Azolla filiculoides*, por sus características biológicas y su fácil manejo, se presenta como un modelo ideal para el aprendizaje práctico de conceptos relacionados con la ecología, la biología, la química y la agricultura sostenible.

El cultivo de *Azolla* en el aula o en el huerto escolar ofrece a los estudiantes la oportunidad de:

- **Comprender los ciclos biogeoquímicos:** El ciclo del nitrógeno es un ejemplo claro de cómo los elementos químicos se mueven entre los seres vivos y el medio ambiente. El cultivo de *Azolla* permite a los estudiantes observar la fijación biológica de nitrógeno y su importancia para el crecimiento de las plantas.

- **Experimentar con diferentes variables:** Los estudiantes pueden diseñar experimentos para evaluar el efecto de diferentes factores, como la luz, la temperatura, el pH o la concentración de nutrientes, en el crecimiento de la *Azolla*.
- **Desarrollar habilidades de investigación científica:** El cultivo de *Azolla* brinda a los estudiantes la oportunidad de formular preguntas, diseñar experimentos, recolectar y analizar datos, y comunicar sus resultados.
- **Fomentar la conciencia ambiental:** La experiencia de cultivar *Azolla* y observar su interacción con el ambiente puede fomentar en los estudiantes el pensamiento crítico, la creatividad y la responsabilidad ambiental.

#### **Bases nutritivas para la propagación de *Azolla filiculoides***

El crecimiento y la capacidad de fijación de nitrógeno de la *Azolla filiculoides* están influenciados por la disponibilidad de nutrientes en el medio acuático en el que se desarrolla. Si bien la *Azolla* puede obtener nitrógeno de la atmósfera a través de su simbiosis con la *Anabaena*, requiere de otros nutrientes, como fósforo, potasio, calcio, magnesio y hierro, para su crecimiento óptimo.

La elección de la base nutritiva para la propagación de *Azolla* es un factor crítico para asegurar su crecimiento y su capacidad de fijación de nitrógeno. Las bases nutritivas pueden ser de origen inorgánico, como las sales minerales, o de origen orgánico, como los estiércoles animales, los compost o los biofertilizantes líquidos.

#### ***Gallinaza como base nutritiva***

La gallinaza es el estiércol de gallina, generalmente mezclado con los residuos de la cama, como paja o viruta. Es un material rico en nutrientes, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio, por lo que ha sido utilizado tradicionalmente como abono orgánico en la agricultura.

La gallinaza, por su alto contenido de nutrientes, puede ser una base nutritiva adecuada para la propagación de *Azolla filiculoides*. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la gallinaza fresca puede tener un alto contenido de amonio, lo que puede ser tóxico para la *Azolla*. Por ello, se recomienda compostar la gallinaza antes de utilizarla como base nutritiva para la *Azolla*.

#### ***Estiércol bovino como base nutritiva***

El estiércol bovino es el excremento de vaca, generalmente mezclado con los residuos de la cama, como paja o viruta. Es un material rico en materia orgánica y nutrientes, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio, aunque en menor concentración que la gallinaza.

El estiércol bovino, al igual que la gallinaza, puede ser una base nutritiva adecuada para la propagación de *Azolla filiculoides*. Al igual que la gallinaza, se recomienda compostar el estiércol bovino antes de utilizarlo como base nutritiva para la *Azolla*, para reducir su contenido de amonio y patógenos.

### **Materiales y métodos**

#### **Ubicación del estudio**

El presente estudio se llevó a cabo en la Finca Paraíso Verde, ubicada en la localidad de Los Bajos Grande, perteneciente al cantón Montecristi, provincia de Manabí, Ecuador. La finca se encuentra a una altitud de 154 msnm y presenta un clima semiárido, con una temperatura media anual de 29°C y una precipitación media anual de 736 mm.

#### **Diseño experimental**

Para evaluar la incidencia de los sustratos orgánicos (gallinaza y estiércol bovino) en la propagación de *Azolla filiculoides*, se estableció un diseño experimental bifactorial completamente aleatorio (DCA), con dos factores de estudio:

## RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE NITRÓGENO DEL HELECHO AZOLLA FILICULOIDES

- **Factor A: Base nutritiva:** Con dos niveles: gallinaza y estiércol bovino.
- **Factor B: Dosificación:** Con tres niveles: 0,20 kg/m<sup>2</sup>, 0,40 kg/m<sup>2</sup> y 0,60 kg/m<sup>2</sup>.

La combinación de los factores de estudio dio como resultado seis tratamientos y un testigo, con tres repeticiones cada uno, para un total de 21 unidades experimentales.

**Manejo del experimento**

- **Preparación del sustrato:** La gallinaza y el estiércol bovino fueron obtenidos de la misma finca, donde se encontraban previamente compostados. Se tamizaron ambos sustratos para obtener un material homogéneo y se mezclaron con agua para obtener una solución con la concentración deseada para cada tratamiento.

- **Unidades experimentales:** Se utilizaron 21 cajas de plástico de 1 m de ancho x 1 m de largo x 0.5 m de profundidad como unidades experimentales. Las cajas se colocaron en un área abierta, expuestas a la luz solar directa.

- **Siembra:** Se utilizó *Azolla filiculoides* obtenida de un cultivo preexistente en la misma finca como material de siembra. La *Azolla* se lavó con agua para eliminar residuos del medio de cultivo anterior y se pesaron 35 g de *Azolla* fresca para cada unidad experimental.

- **Llenado de las unidades experimentales:** Se llenaron las unidades experimentales con 200 L de agua de pozo y se añadieron las soluciones de gallinaza o estiércol bovino, según el tratamiento correspondiente. Se dejó reposar el agua durante 24 horas para que se estabilizara la temperatura y el pH antes de la siembra de la *Azolla*.

- **Manejo del cultivo:** Se monitoreó diariamente el cultivo de *Azolla*, retirando manualmente las malezas y reponiendo el agua evaporada para mantener un volumen constante en las unidades experimentales.

**Variables evaluadas**

## RENDIMIENTO Y CONTENIDO DE NITRÓGENO DEL HELECHO AZOLLA FILICULOIDES

- **VARIABLES INDEPENDIENTES:**
  - Base nutritiva: Gallinaza y estiércol bovino.
  - Dosificación: 0,20 kg/m<sup>2</sup>, 0,40 kg/m<sup>2</sup> y 0,60 kg/m<sup>2</sup>.
- **VARIABLES DEPENDIENTES:**
  - Rendimiento de biomasa: Se determinó el peso fresco de la *Azolla* cosechada por unidad de superficie (g/m<sup>2</sup>), al finalizar el período experimental (27 días).
  - Composición química de la biomasa: Se tomaron muestras de *Azolla* de cada tratamiento al finalizar el experimento para determinar su contenido de nitrógeno total (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), manganeso (Mn), boro (B), materia seca (MS) y cenizas.
  - Composición fisicoquímica del agua residual ("NitrAgua"): Se recolectaron muestras del agua de cada tratamiento al finalizar el experimento para determinar el pH, conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD), nitrógeno total (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg).

**Análisis estadístico**

Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores (base nutritiva y dosificación), utilizando el programa estadístico Infostat (versión 2020). Se realizó una prueba de comparación de medias (DMS de Fisher) al 5% de significancia para determinar las diferencias significativas entre los tratamientos.

**Resultados****Rendimiento de biomasa**

Los resultados del análisis de varianza mostraron que existe un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) de la base nutritiva y la dosificación, así como de la interacción entre ambos factores, sobre el rendimiento de biomasa de *Azolla filiculoides*.

El mayor rendimiento de biomasa se obtuvo con el tratamiento T3 (gallinaza a una dosificación de  $0.60 \text{ kg/m}^2$ ), con un promedio de  $1812.65 \text{ g/m}^2$  al finalizar el período experimental de 27 días. Este tratamiento superó significativamente ( $p < 0.05$ ) a los demás tratamientos, incluyendo al testigo (sin adición de base nutritiva).

### **Composición química de la biomasa**

El análisis de la composición química de la biomasa de *Azolla* mostró que el contenido de nutrientes varía significativamente ( $p < 0.05$ ) en función de la base nutritiva y la dosificación utilizadas.

En general, la *Azolla* cultivada con gallinaza presentó un mayor contenido de nitrógeno, fósforo y potasio que la cultivada con estiércol bovino. Esto se debe probablemente a que la gallinaza tiene una mayor concentración de estos nutrientes que el estiércol bovino.

### **Composición fisicoquímica del agua residual ("NitrAgua")**

Los resultados del análisis fisicoquímico del agua residual ("NitrAgua") mostraron que los tratamientos con *Azolla* presentaron una mejora significativa ( $p < 0.05$ ) en la calidad del agua, en comparación con el testigo (sin *Azolla*).

En general, los tratamientos con *Azolla* mostraron:

- Un aumento en el pH del agua, acercándose a la neutralidad.
- Una disminución en la conductividad eléctrica (CE) del agua, lo que indica una

menor salinidad.

- Una reducción en los sólidos totales disueltos (STD), lo que sugiere una mayor capacidad de la *Azolla* para absorber nutrientes del agua.

### Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la *Azolla filiculoides* puede ser propagada exitosamente utilizando bases nutritivas orgánicas de bajo costo, como la gallinaza y el estiércol bovino. Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para la promoción de una agricultura más sostenible, al ofrecer una alternativa viable a los fertilizantes nitrogenados sintéticos.

La gallinaza, a una dosificación de 0.60 kg/m<sup>2</sup>, demostró ser la base nutritiva más eficiente para la producción de biomasa de *Azolla*, en las condiciones de este estudio. Este resultado se atribuye a la alta concentración de nutrientes, especialmente nitrógeno, fósforo y potasio, que aporta la gallinaza al medio de cultivo.

Si bien el estiércol bovino también promovió el crecimiento de la *Azolla*, su eficiencia fue menor en comparación con la gallinaza. Esto se debe probablemente a que el estiércol bovino tiene una menor concentración de nutrientes que la gallinaza.

El análisis de la composición química de la biomasa de *Azolla* confirmó su alto valor nutricional, tanto para su uso como biofertilizante como para su incorporación en la alimentación animal. La *Azolla* cultivada con gallinaza presentó un mayor contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, lo que la convierte en una fuente rica de estos nutrientes esenciales para las plantas.

Un hallazgo relevante de este estudio es la capacidad de la *Azolla* para mejorar la calidad del agua residual ("NitrAgua"). La *Azolla* actuó como un filtro biológico, absorbiendo nutrientes del agua y reduciendo su salinidad. Esta característica tiene un gran potencial para la biorremediación de aguas contaminadas por la actividad agrícola o industrial.

### **Implicaciones para la educación ambiental**

Este estudio, además de sus aportes al campo de la agronomía, ofrece una valiosa oportunidad para integrar la investigación científica con la educación ambiental. La *Azolla filiculoides*, por sus características biológicas y su fácil manejo, se posiciona como un modelo pedagógico ideal para abordar conceptos claves de la ecología, la biología, la química y la agricultura sostenible.

A continuación, se plantean algunas ideas para integrar el cultivo de *Azolla* en el currículo escolar:

- **Diseño e implementación de un sistema de acuaponía a pequeña escala:** La acuaponía es un sistema de producción de alimentos que combina la acuicultura (cría de peces) con la hidroponía (cultivo de plantas en agua). La *Azolla* puede ser incorporada en un sistema de acuaponía como un biofiltro natural, absorbiendo los nutrientes del agua proveniente de los tanques de peces y utilizándolos para su crecimiento. Los estudiantes pueden participar en el diseño, la construcción y el mantenimiento del sistema de acuaponía, aprendiendo sobre los ciclos biogeoquímicos, la ecología de los ecosistemas acuáticos y la producción sostenible de alimentos.
- **Experimentación con diferentes variables que afectan el crecimiento de la *Azolla*:** Los estudiantes pueden diseñar y llevar a cabo experimentos para evaluar el efecto de diferentes variables, como la intensidad lumínica, la temperatura, el pH del agua, la concentración de nutrientes o la presencia de contaminantes, sobre el crecimiento de la *Azolla*. Esta actividad promueve el desarrollo de habilidades científicas, como la observación, la formulación de hipótesis, el diseño experimental, la recolección y análisis de datos, y la comunicación de resultados.

- **Investigación sobre los usos tradicionales de la *Azolla* en diferentes culturas:** Los estudiantes pueden investigar sobre las diferentes culturas que han utilizado la *Azolla* a lo largo de la historia, sus métodos de cultivo, sus aplicaciones en la agricultura y la alimentación, y su importancia cultural. Esta actividad fomenta la investigación interdisciplinaria, la comprensión de la diversidad cultural y la valoración de los conocimientos tradicionales.
- **Campañas de sensibilización sobre la importancia de la agricultura sostenible:** Los estudiantes pueden diseñar y llevar a cabo campañas de sensibilización en su comunidad sobre la importancia de la agricultura sostenible, utilizando la *Azolla* como un ejemplo concreto de una alternativa viable a los fertilizantes químicos. Estas campañas pueden incluir charlas, talleres, elaboración de materiales informativos, entre otras actividades.

### Conclusiones

Los resultados de este estudio demuestran el potencial de la *Azolla filiculoides* como biofertilizante y como herramienta para la educación ambiental. Su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico, su rápido crecimiento, su fácil manejo y su capacidad para mejorar la calidad del agua la convierten en una aliada estratégica para la construcción de sistemas de producción agrícola más sostenibles y para la formación de ciudadanos responsables con el medio ambiente.

La integración de la *Azolla* en el currículo escolar ofrece una oportunidad única para que los estudiantes se involucren en la investigación científica, comprendan la complejidad de los ecosistemas y desarrollen soluciones innovadoras a problemáticas ambientales.

Se recomienda continuar con las investigaciones sobre *Azolla filiculoides*, explorando su potencial en diferentes contextos agroecológicos y sus aplicaciones en la producción de

alimentos y la biorremediación de aguas contaminadas. Asimismo, se sugiere promover la incorporación de la *Azolla* como herramienta educativa en todos los niveles de enseñanza, con el fin de fomentar la conciencia ambiental y la construcción de un futuro más sostenible.

### Referencias

- Ayala Herrería, J. A. (2024). *Prácticas agrícolas sostenibles y la rentabilidad. caso de estudio Apaec, Cotacachi* (Tesis de grado - Universidad Técnica del Norte). <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/16131>
- Berru Garcia, L. (2023). Uso de fertilizantes sintéticos en el cultivo de maíz en la provincia de El Dorado 2022. (Tesis de grado - Universidad Nacional de San Martín). <https://tesis.unsm.edu.pe/handle/11458/5632>
- Briones Morales, J. C., San Martín Aguilera, G. E., & Cáceres Cruz, G. (2021). *Estudio comparativo de la normativa chilena con la Unión Europea sobre la protección del medio ambiente por el uso de fertilizantes nitrogenados* (Tesis doctoral - Universidad Tecnológica Metropolitana). <https://repositorio.utem.cl/bitstream/handle/30081993/1215/Trabajo%20Titulacio%20n%20Con%20Nota.pdf?sequence=1>
- Bunch, R. (2020). Aprender de la historia para restaurar nuestros suelos. *LEISA revista de agroecología*, 36(4), 8-9.
- Celis Rodriguez, D. (2021). Evaluación de ácidos grasos volátiles como fuentes de carbono en el proceso de fijación biológica de nitrógeno. (Tesis de grado - Universidad Francisco de Paula Santander). <https://repositorio.ufps.edu.co/handle/ufps/353>

- Díaz-Gutiérrez, J. P., Quila-Bonoso, K. M., Zambrano-Gavilanes, F., & Bravo-Zamora, R. (2022). Efectos de la fertilización orgánica en el cultivo de algodón (*Gossypium hirsutum*). *Biotempo*, 19(2), 291-301.
- Dorado Guerra, D. Y. (2024). *Modelización integrada con aprendizaje automático para evaluar la contaminación por nutrientes en las masas de agua actual y bajo el efecto del cambio climático. Aplicación a la Demarcación Hidrográfica del Júcar* (Tesis doctoral - Universitat Politècnica de València). <https://riunet.upv.es/handle/10251/202898>
- Fuentes Quijandria, F. G. (2023). Impacto ambiental de los fertilizantes fosfatados en el nivel de contaminación por cadmio en suelos cultivados en el valle de Ica. (Tesis doctoral - Universidad Nacional “San Luis Gonzaga”). <https://repositorio.unica.edu.pe/items/8c0dc7c8-58fc-4c19-8422-e25ad073e80e>
- Grimi, A. J. (2020). *Pérdida de nutrientes y reposición por fertilizantes en Argentina, una mirada desde la economía ecológica* (Tesis de grado - Universidad Nacional de Rosario). <https://rephip.unr.edu.ar/server/api/core/bitstreams/37d78d43-7ced-428f-95d4-19ee6793aada/content>
- Lihuisi Juarez, A. Y. (2023). Estudio de la sensibilidad de la capacitancia de los sensores interdigitales basado en grafeno para iones de nitratos en suelo. (Tesis de maestría - Universidad Nacional San Luis Gonzaga). <https://repositorio.unica.edu.pe/items/091b6b89-c0da-4428-a87d-7308f03dd3e6>
- Lloret Pastor, F. (2022). Fijación biológica del nitrógeno y síntesis del nitrato: usos y aplicaciones. *Anales de Química de la RSEQ*, 118(4), 248-248.

Lokazyuk, P. (2023). Estudio técnico-económico inicial de usos industriales de la biomasa procedente de especies vegetales invasoras. (Tesis de maestría - Universidad de Sevilla).

<https://idus.us.es/handle/11441/151950>

Montiel León, V. D. (2024). *Análisis de curvas de absorción de nutrientes en cultivo de maíz y arroz* (Tesis de grado - Universidad Técnica de Babahoyo).

<http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16037>

Muñoz Muñoz, K. A. (2024). *Aislamiento, caracterización e identificación de bacterias con capacidad fijadora de nitrógeno atmosférico asociadas con la rizosfera de Solanum tuberosum L. Var. Superchola* (Tesis de maestría – Universidad Técnica de Ambato).

<https://repositorio.uta.edu.ec:8443/handle/123456789/41457>

Valle Acaro, E. P. (2024). *Evaluación del comportamiento de Azolla Anabaena (Azolla Filiculoides Var. Cristata) bajo diferentes dosis de sustrato orgánico en Santa Elena Ecuador* (Tesis de grado, La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena).

<https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/10887>