

Fitorremediación de aguas residuales empleando lenteja de agua (*Lemna minor*), una planta con potencial en el cuidado ambiental

Enrique V. Paravani, Mariana Bianchi, María G. Acosta, María V. Ormaechea, Andrea Porcaro

Autoras/es: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Entre Ríos. Ruta provincial 11, km 10 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina

Contacto: enrique.paravani@uner.edu.ar

ARK: <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s22504559/63df7137j>

Resumen

La lenteja de agua (*L. minor*) es una especie de planta acuática que se encuentra en la superficie de los cuerpos de agua. Es una planta de crecimiento acelerado y gran capacidad de proliferación que hacen de sí, una planta competitiva. Recientemente, se han llevado a cabo diferentes investigaciones sobre el potencial de esta planta y del cómo pueden llegar a ser útiles para el ser humano, puesto que sirven de alimento, materia prima para la industria y se usan en procesos de biorremediación. *L. minor* puede absorber algunas sustancias disueltas y brindar oxígeno mediante fotosíntesis. Se realizaron diferentes estudios utilizando *L. minor* expuestas a efluentes porcinos, para evaluar el potencial impacto sobre la fitorremediación en las aguas residuales. Los resultados encontrados aportan conocimiento y herramientas para generar remediación ambiental producida por los establecimientos porcinos a lo largo de la provincia de Entre Ríos y provincias que tengan actividad porcina entre sus actividades productivas.

Palabras clave: contaminación ambiental, efluentes porcinos, fitorremediación, lenteja de agua

Objetivos propuestos y cumplidos

1. Actualización bibliográfica permanente.
2. Caracterización fisicoquímica y biológica del efluente crudo. Estudio de la adaptabilidad de la lenteja de agua (*L. minor*).
3. Análisis fisicoquímico y biológico del efluente porcino.
4. Estudio de fitorremediación bajo diferentes concentraciones del efluente porcino.
5. Evaluación final de la composición química de la lenteja de agua (*L. minor*) después de la depuración.
6. Presentación de resultados en congresos y reuniones científicas.
7. Publicaciones de resultados.
8. Redacción del informe final.

Marco teórico

Situación actual de la provincia de Entre Ríos

Entre Ríos, ubicada en el centro-este de Argentina, posee una economía basada en actividades agropecuarias, con un crecimiento notable del sector agrícola en los últimos años. Su producción ganadera incluye importantes sistemas avícola, bovino y porcino. Esta última ocupa el cuarto lugar a nivel nacional, con más de 400 mil cabezas en 2020, y ha experimentado un crecimiento acelerado desde 2012. La intensificación productiva genera residuos y efluentes que, sin una gestión adecuada, representan riesgos ambientales y sanitarios, como contaminación hídrica, malos olores y enfermedades zoonóticas. La red hidrográfica de la provincia y la vulnerabilidad de sus suelos a la erosión aumentan estos riesgos, especialmente por el escurrimiento de aguas contaminadas.

Aunque se reconoce el potencial de los residuos como enmiendas orgánicas para el suelo, su uso requiere normativas específicas. Actualmente, no existe un marco regulatorio local para efluentes porcinos y se aplican, muchas veces criterios de otras provincias. Es urgente contar con información científica propia y tecnologías adaptadas, además de una coordinación intersectorial eficaz, para prevenir impactos ambientales y mejorar la gestión sostenible de estos sistemas productivos.

Lenteja de agua (*Lemna minor*)

L. minor es una pequeña planta acuática flotante, perteneciente a la familia Lemnaceae. Presenta un cuerpo vegetativo taloide sin diferenciación entre tallo y hojas, con una raíz única y delgada que en esta especie participa en la absorción de nutrientes, especialmente nitrógeno inorgánico. Mide entre 2 y 4 mm y se reproduce principalmente por gemación asexual, formando grupos de hasta 4 individuos. Es una planta monóica con flores unisexuales muy pequeñas: las masculinas tienen un estambre y las femeninas un pistilo. Sus flores nacen en una hendidura de la fronda y pueden producir de 1 a 4 semillas. Su morfología simple y rápido crecimiento la hacen útil en estudios de remediación ambiental.

Condiciones ambientales para *L. minor*

El crecimiento está influenciado por factores como pH, temperatura, luz y composición del agua. Su rango ideal de pH para un desarrollo óptimo se encuentra entre 4,5 y 7,5, aunque puede tolerar condiciones extremas entre 3,7 y 10, con mejor crecimiento

cerca de pH 7,0, especialmente cuando hay buena disponibilidad de nitrógeno. Respecto a la temperatura, algunos estudios sitúan el rango óptimo entre 15 °C y 24 °C, aunque otros han demostrado un crecimiento acelerado entre 25,7 °C y 36,8 °C, con capacidad de adaptación entre 6,2 °C y 38 °C. Estas condiciones favorecen su competitividad frente a otras especies acuáticas, haciéndola una planta versátil para aplicaciones de remediación en distintos climas.

Impacto ambiental de la lenteja de agua (*L. minor*)

Tiene un crecimiento rápido y alto contenido de aminoácidos, lo que la convierte en una fuente potencial de alimento para animales, peces, aves de corral e incluso para consumo humano en algunas regiones de Asia. Además, destaca por su capacidad de remediación ambiental, ya que contribuye a la recuperación de cuerpos de agua y al tratamiento de aguas residuales, consolidándose como una herramienta útil y sostenible en el manejo ambiental.

Remediación ambiental con *L. minor*

Es una planta acuática de alto valor proteico que puede cultivarse en aguas contaminadas no tóxicas para ayudar a su recuperación. Su principal aporte en la fitorremediación es la eliminación de nitrógeno y fósforo, además de ser capaz de reducir compuestos tóxicos como amoníaco, metales pesados (níquel, cobre, plomo, zinc, arsénico) y herbicidas como la terbutilazina. Estudios demuestran que esta planta puede disminuir la toxicidad en cuerpos de agua contaminados, especialmente cuando se cultivan varias especies de lentejas juntas, aumentando la eficacia. Además, las plantas bioestimuladas presentan mayor capacidad para eliminar contaminantes. *L. minor* destaca como una de las macrófitas acuáticas más efectivas en la remediación de una amplia gama de contaminantes, incluidos agroquímicos, fármacos, desechos radiactivos y nanomateriales.

Enmienda agrícola con *L. minor*

Una enmienda agrícola es un aporte de material que mejora la calidad del suelo, ajustando nutrientes, pH y composición para favorecer cultivos. Estudios realizados demostraron que el compost elaborado con *L. minor* es tan efectivo como los compost tradicionales para cultivar hortalizas como espinaca y acelga, aportando nutrientes suficientes para buenos rendimientos.

Investigaciones recientes compararon la incorporación de lenteja de agua seca al suelo con fertilizantes convencionales como el fosfato diamónico (DAP). Los resultados mostraron que *L. minor* retiene un 30% más de nitrógeno y minerales, manteniendo un rendimiento agrícola similar, lo que indica su potencial como fuente sostenible de nutrientes para la agricultura.

Metodología del proyecto

El proyecto evaluó el potencial de *L. minor* para remediar purines de la producción porcina mediante un sistema a escala de laboratorio o piloto. Se monitorearon parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH, sólidos sedimentables, demanda química de oxígeno (DQO), nitritos y nitratos; parámetros bioquímicos como demanda bioquímica de oxígeno (DBO5). Además, se analizó la tasa de crecimiento de *L. minor*. Índice de degradabilidad, % de remoción y la tasa de crecimiento de la planta.

Resultados y conclusiones

Se realizó una continua actualización bibliográfica, con el objetivo de poder evaluar las últimas publicaciones y actualizar la bibliografía pertinente, para poder realizar de forma crítica las actividades y elaborar las respectivas conclusiones.

En conjunto con el personal de la Secretaría de Ambiente de la provincia de Entre Ríos, se confeccionó un mapa con algunos de los establecimientos de producción porcina de la provincia. La información para la selección se basó en parámetros como: características intensivas de la cría, puntos de vuelco de los efluentes sobre los cuerpos de agua receptores, tamaño y ubicación del establecimiento, entre otros.

La Figura 1 muestra un mapa con la localización de alguno de los establecimientos más importantes de la provincia de Entre Ríos.

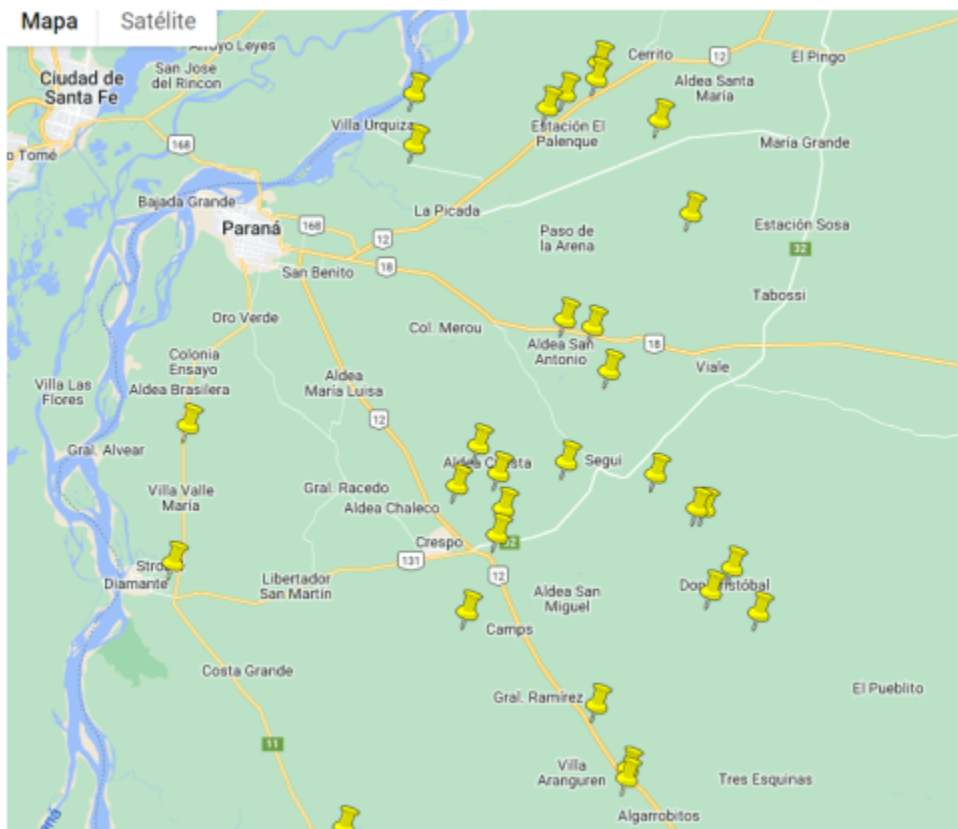


Figura 1: Mapa de localización de los establecimientos porcinos con mayor relevancia en la provincia de Entre Ríos, según la Secretaría de Ambiente, Control y Fiscalización de la provincia.

La Tabla 1 muestra algunas de las características elegidas para la selección de los establecimientos, omitiendo los nombres por razones de confidencialidad.

Departamento	Cuerpo receptor	Tamaño del establecimiento
Nogoyá	Curso de agua semi permanente aportante al Arroyo de la Cruz	Grande
Feliciano	Curso de agua aportante al Arroyo Mula del Paraíso	Mediano

Continuación tabla página 4

Feliciano	Curso de agua semi permanente aportante a Cañada del medio	Chico
Colón	Curso de agua semi permanente aportante a S30406 atraviesa el Parque Nacional el Palmar	Grande
Victoria	Curso de agua semi permanente aportante a S30036	Mediano
Paraná	Curso de agua semi permanente aportante a N60101	Mediano

En la provincia de Entre Ríos, debido a su profusa red hidrográfica, baja permeabilidad de los suelos y marcadas pendientes, el agua superficial constituye uno de los componentes del ambiente más vulnerables a la contaminación. Además, los pronósticos climáticos de incremento en la erodabilidad de las lluvias agudizan las previsiones de riego de escurrimiento superficial y erosión hídrica y en consecuencia arrastre de sedimentos y sustancias hacia aguas superficiales. En consecuencia, reviste particular importancia evaluar los efectos que puede generar la utilización de grandes volúmenes de residuos, con altas cargas de nutrientes y otros contaminantes. Al mismo tiempo se constituye en una oportunidad si se le da una adecuada gestión para ser utilizados como enmiendas orgánicas con el objetivo de mejorar la fertilidad y la calidad estructural de los suelos agrícolas de la provincia.

Las políticas de cuidado ambiental privilegian instrumentos de ejecución, cuya finalidad es prevenir la ocurrencia de situaciones nocivas para los ecosistemas, con base en la consideración que, por lo general, la eliminación del daño ambiental tiene un costo más alto que su prevención, e incluso que no siempre la eliminación es una alternativa posible.

Es necesario contar con información científico - técnica sobre las propiedades y efectos de los residuos y efluentes, que permitan el establecimiento de normativas y mecanismos que prevengan, reduzcan o controlen sus riesgos ambientales y sanitarios, lo cual implica la necesidad de una coordinación intersectorial eficaz y eficiente.

En la normativa ambiental provincial no existen antecedentes que establezcan niveles de referencia en cuanto a efluentes porcinos utilizándose muchas veces, normativas de otras provincias. Si bien esta forma de trabajo permite avanzar en controles de impactos ambientales en sistemas de producción agropecuarios, es deseable contar con datos propios para poder adaptar los valores máximos permitidos a condiciones locales.

Se conoce que el actuar de algunos establecimientos a lo largo de la provincia, en general causan un impacto sobre el ambiente, debido a la actividad que realizan y que muchas veces no son buenas sus prácticas, por desconocimiento o por omisión.

Luego de haber confeccionado el mapa provincial con los establecimientos seleccionados, se comenzó a tener reuniones para analizar la mejor estrategia con el fin de recolectar las muestras y que estas puedan llegar en condiciones y en tiempo al Laboratorio de Química Ambiental de la FIUNER, para su posterior procesamiento. Luego de varios encuentros y del análisis de factibilidad, se seleccionó un establecimiento "modelo" para la recolección del efluente, dadas las características de crianza, número de madres, dimensiones, cantidad de piletas de tratamientos, cercanía con la FIUNER. A este establecimiento se lo tomó como referente o modelo para la ejecución de los objetivos del proyecto.

Posteriormente, se trabajó en la adecuación de un espacio en la FIUNER, para poder mantener y reproducir la planta, bajo condiciones controladas. A este lugar se le realizó la instalación eléctrica para colocar iluminación con un regulador de fotoperíodo. Se instalaron repisas para tener una mejor disposición y distribución de las bateas que contienen las plantas. Se adquirieron soluciones de macro y micronutrientes para acondicionar la solución requerida por la planta (Figura 2).

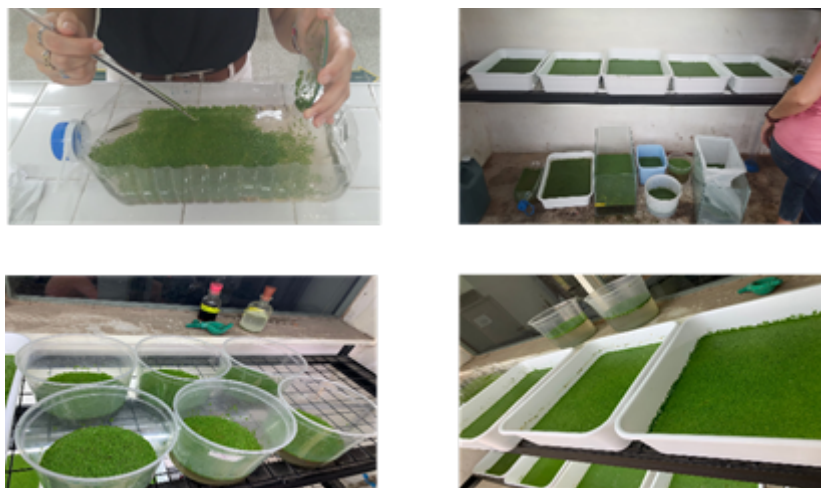


Figura 2: Acondicionamiento del espacio destinado para el mantenimiento y crecimiento de la planta, bajo condiciones controladas de laboratorio.

Después de varios ensayos en los que se variaron las concentraciones de macro y micronutrientes, cambios de pH y conductividad, se logró obtener una solución acorde para el mejor crecimiento, reproducción y mantenimiento de la planta. Bajo condiciones controladas, se determinó que el valor de conductividad debía estar cercano a $1.100 \mu\text{S}/\text{cm}$ y el valor de pH en el rango de 6,2 a 7,8. Con estos valores se logró mantener una muy buena cantidad de plantas para todo el proyecto, con un crecimiento sostenido y en óptimas condiciones.

A continuación, se comenzó con la etapa de recolección y análisis del efluente a utilizar para los tratamientos. En esta etapa se recolectaron muestras del efluente crudo (primera pileta de tratamiento) durante diferentes períodos, a los que se determinaron parámetros fisicoquímicos (Tabla 2).

Determinaciones	Efluente crudo (primera pileta)
Sólidos Sedimentables en 10min [ml/L]	0,2
Sólidos Sedimentables en 2hs [ml/L]	0,3
DBO (5 días) [mgO ₂ /L]	270
pH	7,96
DQO [mgO ₂ /L]	3.550
Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	7.606
Grasas / aceites [PPM]	162

El principal objetivo de estos análisis fue monitorear el efluente según los diferentes momentos de producción en el establecimiento, además de los cambios en las condiciones ambientales de las piletas de tratamiento.

Con esta información, se pudo concluir que el efluente proveniente de la primera pileta no podría ser empleado para la exposición de la lenteja de agua y su posterior tratamiento, debido a los altos valores que presentaba, principalmente de conductividad, según los parámetros determinados previamente en el laboratorio. Por esta razón se seleccionó el efluente proveniente de la tercera pileta de tratamiento, pileta intermedia de las cinco que posee el establecimiento.

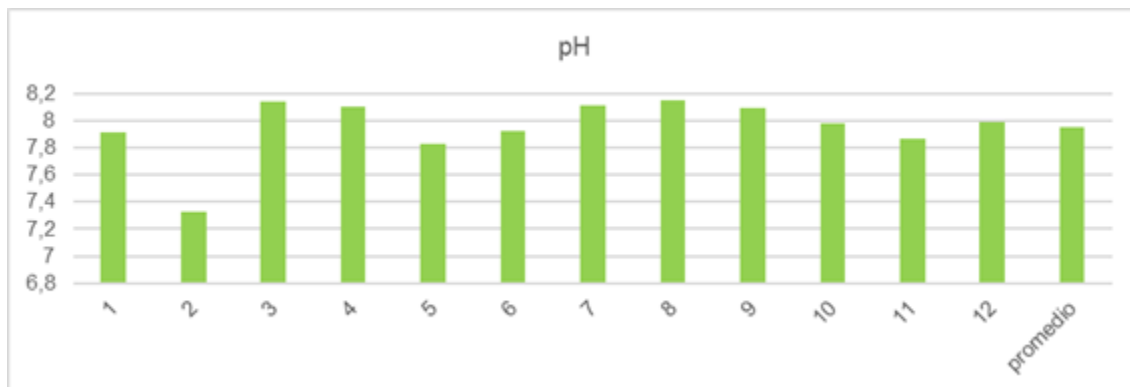
A partir de esta decisión, se recolectaron mensualmente muestras para su posterior análisis. En la tabla 3, se observa el seguimiento temporal de este efluente con los parámetros analizados.

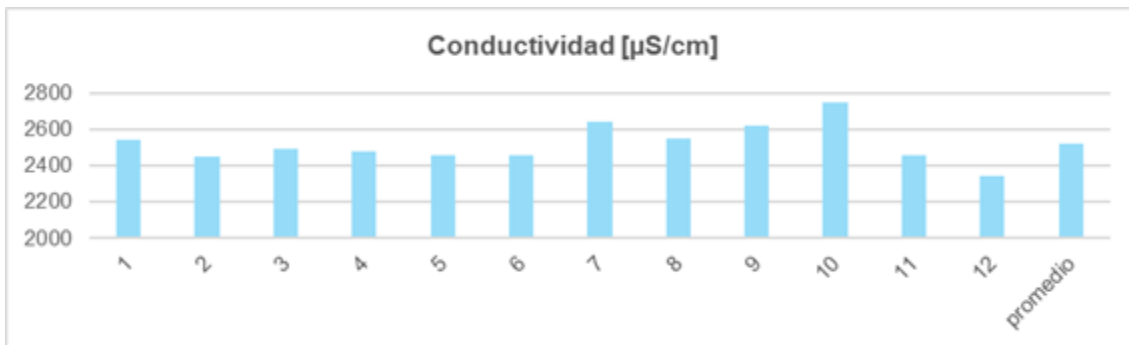
Tabla 3: Resultados obtenidos del análisis del efluente de la tercera pileta en el establecimiento “modelo”, a lo largo de diferentes muestreos.

Muestreos / Parámetros analizados	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SS10min [ml/L]	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1
SS2hs [ml/L]	0,2	0,1	0,3	0,3	0,5	0,3	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1
DBO5 [mgO2/L]	94	98	91	92	95	97	101	89	90	90	92	96
pH	7,9	7,3	8,1	8,1	7,8	7,9	8,1	8,1	8,1	7,9	7,8	7,9
DQO [mgO2/L]	1875	1896	1792	1863	1936	1875	1623	1689	1792	1963	2011	1993
Cond. [µS/cm]	2544	2452	2489	2478	2456	2458	2642	2549	2623	2745	2458	2345
Grasas/aceites [PPM]	32	29	34	36	41	39	36	37	39	36	34	36

Ref.: SS10min = sólidos sedimentables a 10 minutos; SS2hs = sólidos sedimentables a 2 horas; Cond. = conductividad

En la Figura 3 se observan las variaciones temporales del pH y conductividad, respectivamente y el promedio de dichos parámetros.





Posteriormente, se comenzó con la exposición de la planta al efluente de la tercera pileta de tratamiento, previo a realizar una dilución 1/10 del mismo, con el propósito de bajar la conductividad a un valor cercano a 1100 µS/cm y así poder evaluar el potencial remediador de la misma, bajo condiciones de laboratorio.

Se utilizó la bibliografía recolectada para obtener referencias previas sobre posibles tiempos de exposición, además de organizar varias reuniones con el equipo del proyecto para analizar diferentes posibilidades. Luego de analizar y discutir opciones, se acordó exponer la planta (6g) durante 5 días a un litro y medio del efluente, bajo condiciones controladas. Este tiempo fue, principalmente elegido para evitar la evaporación del efluente en los recipientes utilizados (Figura 4).



Figura 4: Exposición de la planta al efluente porcino y análisis de parámetros fisicoquímicos.

Se muestran los valores determinados en el efluente luego de la dilución 1/10, antes del tratamiento con la planta (Tabla 4).

Tabla 4: Valores determinados de los parámetros en el efluente de la tercera pileta de tratamiento, diluido 1/10, antes de la exposición con *L. minor*

Parámetro	Valor hallado
pH	7,95
Conductividad [µS/cm]	1105
Nitritos [ppm]	3,12
Nitratos [ppm]	29,31
DBO5 [mgO2/L]	13
DQO [mgO2/L]	143

El pH, dentro del rango neutro-alcalino, resulta adecuado para sistemas biológicos en general. La alta conductividad, en relación al agua de río, indica presencia significativa de sales disueltas, esto puede afectar el crecimiento vegetal y la fauna acuática.

El efluente presenta elevados niveles de nitritos, estos son tóxicos para organismos acuáticos incluso a bajas concentraciones. Su presencia puede indicar una nitrificación incompleta. Los elevados niveles de nitratos podrían indicar oxidación de nitrógeno, pero podrían contribuir a la eutrofización si el efluente se libera a cuerpos de agua naturales.

Este efluente, incluso diluido, presenta una carga considerable de nutrientes (N) y materia orgánica, lo cual es típico de residuos ganaderos, especialmente los provenientes de la industria porcina. Los valores de DBO y DQO indican una carga orgánica significativa, lo que puede generar efectos ambientales adversos si no se trata adecuadamente antes de su disposición final.

A continuación, se muestran los valores determinados, luego de la exposición (n = 4) de la planta al efluente. Estos análisis se realizaron al menos 3 veces durante la última etapa del proyecto y por cuadruplicado.

Tabla 5: Resultados obtenidos al finalizar la exposición de la planta al efluente porcino (n = 4).

	batea 1	batea 2	batea 3	batea 4	Promedio
Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	821	786	777	695	769,75
Nitratos [ppm]	5,13	4,02	5,36	4,07	4,64
Nitritos [ppm]	1,02	1,13	0,67	0,98	0,95
DBO5 [mgO ₂ /L]	5	4	4	5	4,5
DQO [mgO ₂ /L]	41	42	41	41	41,25
Masa planta [g]	6,58	6,18	6,77	6,54	6,52

Se observa una disminución notable de la conductividad, lo que indica disminución de sales disueltas, y refleja la absorción de nutrientes por la planta. También hubo una reducción de concentración de nitratos y nitritos, lo que logra una mejora en calidad y menor toxicidad del agua.

A partir de estos resultados, se pudo calcular el índice de degradabilidad, según la siguiente fórmula, utilizando los valores promedios:

$$f = \frac{DBO5}{DQO}$$

se observó que el efluente original tiene un valor de 0,09, mientras que al finalizar el tiempo de exposición se obtuvo un valor de 0,11 lo que resulta en un 82% de degradabilidad de dicho efluente a los 5 días de exposición con la planta.

También se calculó el % de remoción, tanto para el DBO5 como para el DQO, según la siguiente fórmula:

$$\% \text{ remoción} = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100$$

Respecto al % de remoción para el DBO5 se obtuvo un valor de 65,38%, mientras que para el DQO fue del 71,15%. Lo que muestra que, en el tiempo de tratamiento, hubo una remediación del efluente por acción de la planta, arriba del 60% para los parámetros analizados en 5 días de exposición.

El tercer parámetro que se analizó fue la tasa de crecimiento de la planta, según la fórmula:

$$\mu = \frac{\ln(Wt) - \ln(W0)}{t}$$

dónde:

μ : tasa de crecimiento específica (en días)

W0: biomasa inicial de *L. minor* (g)

Wt: biomasa al final del periodo (g)

t: tiempo en días

Este resultado indica que la población de *L. minor* creció a un ritmo específico de **0.017 d⁻¹** bajo ese tratamiento con el efluente porcino, lo que significa que su biomasa aumento en promedio un 1,7% por día en condiciones experimentales.

Conclusiones

Luego de la ejecución del proyecto y con los resultados obtenidos se podrían sacar las siguientes conclusiones:

Disminución de la carga orgánica (DBO5): La fitorremediación resultó en una reducción significativa de la DBO5, mejorando la calidad del agua tratada y permitiendo su posible reutilización, siempre bajo la supervisión de la Secretaría de Ambiente de la provincia y con los controles adecuados.

Generación de biomasa aprovechable: El crecimiento de la planta en contacto con el efluente porcino permitió la producción de biomasa, la que podría ser utilizada en compostaje, generación de biogás o como ingrediente para alimentos animales, siempre y cuando se evalúe la acumulación de sustancias tóxicas y no perjudiciales para los animales y consumo humano.

Influencia del pretratamiento: Se observó que el rendimiento de la fitorremediación mejora cuando el efluente porcino es sometido a procesos de pretratamiento como la sedimentación o dilución, reduciendo la carga de sólidos suspendidos y mejorando las condiciones de crecimiento de la planta.

Alternativa sostenible y de bajo costo: La aplicación de *L. minor* como sistema de tratamiento de efluentes porcinos es económicamente viable y ambientalmente sustentable, especialmente para pequeñas explotaciones agropecuarias sin acceso a tecnologías avanzadas.

Potencial en sistemas integrados: *L. minor* se perfila como un componente clave en sistemas de tratamiento integrados (humedales, lagunas anaeróbicas, filtros vegetales), ofreciendo sinergias en la mejora de la calidad del agua.

Por lo que todo esto podría contribuir a la remediación ambiental, significando un aporte importante para el cuidado del medioambiente, lo que impacta en beneficio de la región y sus habitantes.

Indicadores de producción

Congreso internacional

2024. IX CONGRESO ARGENTINO DE LA SOCIEDAD DE TOXICOLOGÍA Y QUÍMICA AMBIENTAL (SETAC) CAPÍTULO ARGENTINO. *Ecotoxicología y Química Ambiental: desafíos y perspectivas hacia un Desarrollo Sostenible. Eficiencia de Lemna minor en la fitorremediación de un efluente porcino.*

Bibliografía

- Appenroth, K., Sree, K., Bog, M., Ecker, J., Seeliger, C., Böhm, V., Jahreis, G. (2018). Nutritional value of the duckweed species of the genus *Wolffia* (*Lemnaceae*) as human food. *Frontier Chemistry*, 483.
- Appenroth, K., Sree, K., Bohm, V., Hammann, S., Veter, W., Leiterer, M., & Jhareis, G. (2017). Nutritional value of dickweeds (*Lemnaceae*) as human food. *Food Chemistry*, 266-273.
- Arce, G., & Caicedo, J. (2000). Efectos del amonio y del pH sobre el crecimiento de la *Spirodela ptyrhiza* cultivado en afluentes de reactor UASB. *Revolution Bol Ecology*, 17-23.
- Arnold, C., Schwarzenbolz, U., & Böhm, V. (2014). Carotenoids and chlorophylls in processed xanthophyll-rich food. *Food Science and Technology*, 442-445.
- Arroyave, M. (2004). La Lenteja de Agua (*Lemna minor* L.): una planta acuática promissoria. *Rev. EIA*, 33-38.
- Bairagi, A., Ghosh, K., Sen, S., & Ray, A. (2002). Duckweed (*Lemna polyrhiza*) leaf meal as a source of feedstuff in formulated diets for rohu (*Labeo rohita* Ham.) fingerlings after fermentation with a fish intestinal bacterium. *Biores. Technol.*, 17-24.
- Bergmann, B., Cheng, J., Classen, J., & Stomp, A. (2000). *In vitro* selection of duckweed geographical isolates for potential use in swine lagoon effluent renovation. *Biore-source Technology*, 13-20.
- Bress, P., Crespo, D., Rizzo, P., & Rossa, F. (2012). Capacidad de las macrofitas *Lemna minor* y *Eichhornia crassipes* para eliminar el níquel. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 153-157. 42
- Brown, P., Tazik, P., Hooe, M., & Blyte, W. (1990). Consumption and apparent dry matter digestibility of aquatic macrophytes by male and female crayfish (*Orconectes virilis*). *Aquaculture*, 55-64.
- Bui, O., & Lindberg. (2002). Use of duckweed as a protein supplement for breeding ducks. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 866-871.
- Bui, X., Ogle, B., & Lindberg, J. (2002). Use of duckweed as a protein supplement for breeding ducks. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 866-871.
- Cedergreen, N., & Vindbek, M. (2002). Nitrogen uptake by floating macrophyte *Lemna minor*. *New Phytol*, 285-292.
- Chakrabarti, R., Clark, W., & Sharma, J. (2018). Production of *Lemna minor* and its amino acid and fatty acid profiles. *Frontier Chemistry*, 479.

- Chará, J. (1998). El potencial de las excretas porcinas para uso múltiple y los sistemas de descontaminación productiva. Caracas.
- Chew, E., Clemons, T., SanGiovanni, J., Danis, R., Ferris, F., & Elman, M. (2013). Lutein + Zeaxanthin and Omega-3 fatty acids for age-related macular. Food Chemistry.
- Comité de Seguridad Alimentaria Mundial. (2018). La nutrición y los sistemas alimentarios. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición del Comité de Seguridad Alimentaria Mundial. Roma: HLPE.
- Cook, C., & Gut, B. (1974). Water plants of the world: A manual for the identification of the genera of freshwater macrophytes. Junk: The Hague. 43
- Cross, J. (2006). The Charms of Duckweed. Alexandria: Missouri Botanical Garden.
- Cui, W., & Cheng, J. (2015). Growing duckweed for biofuel production: A review. Plant Biology, 16-23.
- Dehghan, M., Mente, A., Zhang, X., Swaminathan, S., Li, W., Viswanathan, M., Safura, A. (2017). Associations of fats and carbohydrate intake with cardiovascular disease and mortality in 18 countries from five continents (PURE): a prospective cohort study. The Lancet, 2050-2062.
- Dewanji, A. (1993). Amino acid composition of leaf proteins extracted from some aquatic weeds. Journal Agriculture Food Chemistry, 1232.
- Edelman, M., & Colt, M. (2016). Nutrient value of leaf vs seed. Frontiers in Chemistry, 32.
- Ekperusi, A., Sikoki, F., & Nwachukwu, E. (2019). Application of common duckweed (*Lemna minor*) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. Chemosphere, 285-309.
- Forzza, R. (2010). Lista de espécies Flora do Brasil. Río de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro.
- Goswani, R., Shrivastav, A., Sharma, J., Tocher, D., & Chakrabarti, R. (2020). Growth and digestive enzyme activities of rohu *labeo rohita* fed diets containing macrophytes and almond oil-cake. Anim Feed Sci Technol, 263.
- Gür, N., Türker, O., & Böcük, H. (2016). Toxicity assessment of boron (B) by *Lemna minor* L. and *Lemna gibba* L. and their possible use as model plants for ecological risk assessment of aquatic ecosystems with boron pollution. Chemosphere, 1-9.
- Gutierrez, G. (2000). Potencial de la planta *Lemna gibba* en la alimentación de cerdos. Universidad Interinstitucional de Colima. 44
- Guttman, D. (2004). Plants as models for the study of human pathogenesis. Biotechnology Advances, 363-382.
- Hardy, R. (2006). Worldwide fish meal production outlook and the use of alternative protein meals for aquaculture. Universidad Autónoma de Nuevo Leon.
- Hasar. (2002). Role of duckweed (*Lemna minor* L.) harvesting in biological phosphate removal from secondary treatment effluents. Fresenius Environmental Bulletin, 27-29.
- Hemmige, N., Abbey, L., & Asiedu, S. (2007). An overview of nutritional and anti nutritional factors in green leafy vegetables. Horticult Int J, 58-65.
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, ICBF. (2015). El trabajo del ICBF de cara la nutrición infantil: un camino a la equidad. Bogotá: CONPES.
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, ICBF. (2016). ENSIN 2015. Bogotá: ICBF.
- Jahreis, G., & Schaefer, U. (2011). Rapeseed (*Brassica napus*) oil and its benefits for human health. Academic Press, 967-974.

- Jahreis, G., Brese, M., Leiterer, M., Schaefer, U., & Böhm, V. (2016). Legume flours: Nutritionally important sources of protein and dietary fiber. *Ernaehrungs Umschau International*, 36-42.
- Kaplan, A., Zelicha, H., Tsaban, G., Yaskolka Meir, A., Rinott, E., Kovsan, J., Shai, I. (2019). Protein bioavailability of *Wolffia globosa* duckweed, a novel aquatic plant - A randomized controlled trial. *Clinical Nutrition*, 2576-2582.
- Khellaf, N., & Zerdaoui, M. (2009). Phytoaccumulation of zinc by the aquatic plant, *Lemna gibba* L. *Bioresour Technol*, 6137-6140. 45
- Kreider, A., Fernandez, C., Bruns, M., & Brennan, R. (2019). Duckweed as an Agricultural Amendment: Nitrogen Mineralization, Leaching, and Sorghum Uptake. *Journal of environmental quality*, 469-475.
- Kritchevsky, D., & Chen, S. (2005). Phytosterols—Health benefits and potential concerns: A review. *Nutrition Research*, 413-428.
- Liu, C., Dai, Z., & Sun, H. (2017). Potential of duckweed (*Lemna minor*) for removal of nitrogen and phosphorus from water under salt stress. *J Environ Management*, 497-503.
- Lo, B., Elphick, J., Bailey, H., Baker, J., & Kennedy, C. (2015). The effect of sulfate on selenite bioaccumulation in two freshwater primary producers: A duckweed (*Lemna minor*) and a green alga (*Pseudokirchneriella subcapitata*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2842-2845.
- Lonnie, M., Laurie, I., Myers, M., Horgan, G., Russell, W., & Johnstone, A. (2020). Exploring Health-Promoting Attributes of Plant Proteins as a Functional Ingredient for the Food Sector: A Systematic Review of Human Interventional Studies. *Nutrients*, 2291.
- Manchuria, C., & Aruquipa, M. (1996). Aplicación de la *Lemna* sp. (lenteja de agua) para la producción de hortalizas. UNA Puno.
- Monette, F., Samir, L., Louise, M., & Abdelkrim, A. (2006). Comprehensive modeling of mat density effect on duckweed (*Lemna minor*) growth under controlled eutrophication. *Water Res*, 2901-2910.
- Morales, N., Arevalo, K., Ortega, J., Briceño, B., Andrade, C., & Morales, E. (2006). EL pH y la fuente nitrogenada como moduladores del crecimiento de la macrófita *Lemna* spp. *Revista Fasciculo de Agronomia*, 70-83.
- Naumann, B., Eberius, M., & Appenroth, K. (2007). Growth rate-based dose- response relationships and EC-values of ten heavy metals using the duckweed growth inhibition test (ISO 20079) with *Lemna minor* L. clone St. *Journal of Plant Physiology*, 1656-1664.
- Noor, J., Hossain, M., Bari, M., & Azimuddin, K. (2000). Effects of duckweed (*Lemna minor*) as dietary fishmeal substitute for silver barb (*Bar bodes gonionotus* Bleeker) Bangladesh. *Journal Fish*, 35-42.
- Olguin, E., & Hernandez, E. (1998). Use of aquatic plants for recovery of nutrients and heavy metals from wastewater. Institute of Ecology, Environmental Biotechnology.
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Carga Mundial de la Enfermedad. OMS. 47
- Oron, G., Porath, D., & Wildschut, L. (1986). Waste water treatment and renovation by different duckweed species. *Journal Environment England*, 247-263.
- Palacios, J., & Villalobos, S. (2019). Factibilidad económica para la creación de una planta productora de harina de lenteja de agua *Lemna minor* L., como complemento proteico en la alimentación de la especie tilapia roja *oreochromis* spp. Universidad Santo Tomas.

- Panfili, I., Bartucca, M., & Del Buono, D. (2019). The treatment of duckweed with a plant biostimulant or a safener improves the plant capacity to clean water polluted by terbuthylazine. *Sci Total Environment*, 832-840.
- Radic, S., Stipanicev, D., Cvjetko, P., Rajcic, M., Sirac, S., Pevalek, B., & Pavlica, M. (2011). Duckweed *Lemna minor* as a tool for testing toxicity and genotoxicity of surface waters. *Ecotoxicol Environ Safety*, 182-187.
- Roldan, G., & Alvarez, L. (2002). Aplicación del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para el tratamiento de aguas residuales y opciones de reuso de la biomasa producida. *Revista Universidad Católica de Oriente*, 56-71.
- Sasmaz, M., Arslan, E., Obek, E., & Sasmaz, A. (2015). The potential of *Lemna gibba L.* and *Lemna minor L.* to remove Cu, Pb, Zn, and As in gallery water in a mining area in Keban, Turkey. *J Environ Manage*, 246-253.
- Sobrino, A., Miranda, M., Alvarez, C., & Quiroz, A. (2010). Bio-accumulation and toxicity of lead (Pb) in *Lemna gibba L.* (duckweed). *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng*, 107-110.
- Sree, K., & Appenroth, K. (2020). Worldwide Genetic Resources of Duckweed: Stock Collections, The Duckweed Genomes. En X. Cao, P. Fourounjian, & W. Wang, *The Duckweed Genomes* (págs. 39-46). Springer: Compendium of Plant Genomes.
- Sree, K., Bog, M., & Appenroth, K. (2016). Taxonomy of duckweeds (*Lemnaceae*), potential new crop plants. *Emirate Journal of Food and Agriculture*, 291-302. 49
- Sree, K., Dhase, H., Chandran, J., Scheneider, J., Jahreis, G., & Appenroth, K. (2019). Duckweed for Human Nutrition: No Cytotoxic and No Anti-Proliferative Effects on Human Cell Lines. *Plant Foods for Human Nutrition*, 1-2.
- Tavares, A., Rodrigues, R., Machado, F., Esquivel, J., & Roubach, R. (2008). Dried duckweed and comercial feed promote adequate growth performance of tilapia fingerlins. *Biotemas*, 91-97.
- Thomson, E., & Dennis, J. (2013). Common duckweed (*Lemna minor*) is a versatile high-throughput infection model for the *Burkholderia cepacia* complex and other pathogenic bacteria. *PLoS One*, 8.
- Van der Heide, T., Roijackers, M., Nes, V., & Peeters, T. (2006). Simple equation for describing the temperature dependent growth of free-floating macrophytes. *Aquatic Botanic*, 171-175.
- Xu, J., Cui, W., Cheng, J., & Stomp, A. (2012). Growing *Spirodela polyrrhiza* in swine wastewater for the production of animal feed and fuel ethanol: A pilot study. *Clean – Soil Air Water*, 760-765.
- Xue, Y., Peijnenburg, W., Huang, J., Wang, D., & Jin, Y. (2018). Trophic transfer of Cd from duckweed (*Lemna minor L.*) to tilapia (*Oreochromis mossambicus*). *Environ Toxicol Chem*, 1367-1377.
- Yaskolka Meir, A., Tsaban, G., Zelicha, H., Rinott, E., Kaplan, A., Youngster, I., Shai, I. (2019). A Green-Mediterranean Diet, Supplemented with Mankai Duckweed, Preserves Iron-Homeostasis in Humans and Is Efficient in Reversal of Anemia in Rats. *Journal Nutrition*, 1004-1011.
- Yu, G., Liu, H., Venkateshan, K., Yan, S., Cheng, J., & Sun, X. (2011). Functional, physicochemical, and rheological properties of duckweed (*Spirodela polyrrhiza*) protein. *Transactions of the ASABE*, 555-561.

- Zeinstra, G., Somhorst, D., Oosterink, E., Fick, H., Klopping, I., Van der Meer, I., & Mes, J. (2019). Postprandial amino acid, glucose and insulin responses among healthy adults after a single intake of *Lemna minor* in comparison with green peas: a randomised trial. *Journal of Nutritional Science*, 1-11.
- Zelicha, H., Kaplan, A., Yaskolka, A., Tsaban, A., Rinott, E., Shelef, I., Ceglarek, M. (2019). The Effect of *Wolffia globosa* Mankai, a Green Aquatic Plant, on Postprandial Glycemic Response: A Randomized Crossover Controlled Trial. *Diabetes Care*, 1162-1169.
- Zetina, P. (2009). Utilización de la lenteja agua (*lemnaceae*) en la producción de tilapia (*oreochromis* spp.). *Archivos de Zootecnia, Mexico*.
- Zhang, Y., Hu, Y., Yang, B., Ma, F., Lu, P., Li, L., Chen, S. (2010). Duckweed (*Lemna minor*) as a model plant system for the study of human microbial pathogenesis. *PLoS One*, 5.
- Zhao, X., Moates, G., Wellner, N., Collins, N., Coleman, M., & Waldron, K. (2014). Chemical characterisation and analysis of the cell wall polysaccharides of duckweed (*Lemna minor*). *Carbohydrate Polymers*, 410-418.
- Zhao, Z., Shi, H., Liu, C., Kang, X., Chen, L., Liang, X., & Jin, L. (2018). Duckweed diversity decreases heavy metal toxicity by altering the metabolic function of associated microbial communities. *Chemosphere*, 76-82.
- Zhao, Z., Shi, H., Wang, M., Cui, L., Zhao, H., & Yun, Z. (2015). Effect of nitrogen and phosphorus deficiency on transcriptional regulation of genes encoding key enzymes of 52 starch metabolism in duckweed (*Landoltia punctata*). *Plant Physiology and Biochemistry*, 72-81.
- Ziegler, P., Adelman, K., Zimmer, S., Schmidt, C., Appenroth, K. (2015). Relative in vitro growth rates of duckweeds (*Lemnaceae*) – The most rapidly growing higher plants. *Plant Biology*, 33-41.
- Ziegler, P., Sree, K., & Appenroth, K. (2019). Duckweed biomarkers for identifying toxic water contaminants. *Environ Sci Pollut Res Int*, 14797-14822.

PID 6245

Denominación del Proyecto

Fitorremediación de aguas residuales empleando lenteja de agua (Lemna minor), una planta con potencial en el cuidado ambiental.

Unidad de ejecución

Universidad Nacional de Entre Ríos

Dependencia

Facultad de Ingeniería

Cátedra, Área o disciplina científica

Química. Laboratorio de Química Ambiental

Contacto: enrique.paravani@uner.edu.ar

Integrantes del proyecto

Director/a

Paravani, Enrique Valentín

Codirectora

Bianchi, Mariana

Integrantes internos/docentes UNER:

ACOSTA, María Gabriela (FI-UNER); ORMAECHEA, María Valeria (FI-UNER); PORCARO, Andrea (FI-UNER).

Colaboradores: ODETTI, Lucia Magdalena (Cátedra Toxicología, Farmacología y Bioq. Legal, FBCB-UNL); POLETTA, Gisela Laura (Cátedra Toxicología, Farmacología y Bioq. Legal, FBCB-UNL); SIMONIELLO, María Fernanda (Cátedra Toxicología, Farmacología y Bioq. Legal, FBCB-UNL); SASAL, María Carolina (Directora Recursos Naturales y Gestión Ambiental, INTA EEA Paraná).

Becarias: LANGBEIN, Ingrid Mirna Sofía; BARRIONUEVO, Zoe Nicole (FI-UNER)

Fecha de iniciación y finalización efectivas

01 de julio 2023 y 01 de agosto 2025

Aprobación del Informe Final por Resolución C.S. N° 366/25 (07-11-2025)