

Aprovechamiento integral de la cáscara de semilla de girasol en un modelo de Economía Circular: Producción de hongos, enzimas, biogás y biofertilizante

Comprehensive utilization of sunflower seed hulls in a Circular Economy model: Production of mushrooms, enzymes, and biogas and biofertilizer

Presentación: xx/10/2024

Maximiliano Andrés Bidegain

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, CONICET, Grupo de Estudio Ambiente Química y Biología (GEAQB), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
mbidegain@frbb.utn.edu.ar

Sebastián Fiotto

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, Grupo de Estudio Ambiente Química y Biología (GEAQB), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
sfiotto@frbb.utn.edu.ar

Ariel Airasca

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, Grupo de Estudio Ambiente Química y Biología (GEAQB), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
aairasca@frbb.utn.edu.ar

Patricia Benedetti

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca, Grupo de Estudio Ambiente Química y Biología (GEAQB), Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
pbenedet@frbb.utn.edu.ar

Resumen

Este trabajo aborda una propuesta de Economía Circular para aprovechar la cáscara de semilla de girasol (CSG), un residuo abundante en la industria aceitera, como sustrato para el cultivo de hongos comestibles y medicinales, en especial del género *Pleurotus*. Este proceso no solo genera alimentos, sino también un subproducto, el sustrato residual de hongos (SRH), con potencial para la producción de biofertilizantes, biogás y enzimas para biorremediación. Se evaluó la capacidad de un extracto acuoso del SRH para degradar colorantes, observando una degradación del 62 % en verde de malaquita, seguido por el azul de anilina (24 %). El rojo fenol no presentó decoloración significativa. Además, se estudió el uso de SRH para producir biogás en codigestión con estiércol bovino, observando mayor producción en las mezclas con mayor concentración de materia seca. Para cerrar el ciclo, se propone utilizar el biogás obtenido como fuente de energía para la pasteurización de sustrato para el cultivo de hongos. En conclusión, esta estrategia ofrece un enfoque sostenible que genera tanto valor económico como ambiental.

Palabras clave: Biometano, Hongos Gírgolas, Lacasas, Pasteurización

Abstract

This study addresses a Circular Economy proposal to utilize sunflower seed hulls (SSH), an abundant waste in the oilseed industry, as a substrate for the cultivation of edible and medicinal mushrooms, particularly for the *Pleurotus* genus. This process not only produces food but also generates a by-product, spent mushroom substrate (SMS) with potential for the production of biofertilizers, biogas, and enzymes for bioremediation. The ability of an aqueous extract of SMS to degrade dyes was evaluated, showing a 62% degradation of malachite green, followed by aniline blue (24%). Phenol red showed no significant decolorization. Additionally, the capacity of SMS to produce biogas in co-digestion with bovine manure was evaluated, showing higher production in mixtures with higher dry matter concentration. To close the cycle, it is proposed to use the obtained biogas as an energy source for pasteurization in mushroom cultivation. In conclusion, this strategy offers a sustainable solution that generates both economic and environmental value.

Keywords: Biomethane, Laccases, Oyster Mushroom, Pasteurization

Introducción

En el contexto actual de desafíos globales como el lento crecimiento económico, las desigualdades sociales y la degradación ambiental, la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la ONU ha puesto de manifiesto la necesidad de buscar soluciones innovadoras y sostenibles. La gestión integral de residuos y su biotransformación para obtener productos de valor agregado se presenta como una actividad crucial con importantes implicaciones económicas, ambientales y sociales.

La Economía Circular emerge como un nuevo paradigma que busca conciliar el crecimiento económico con la sustentabilidad ambiental. Este enfoque propone que los residuos generados en cada etapa de un proceso tecnológico se utilicen como insumos para la siguiente, promoviendo así la regeneración de recursos naturales y minimizando el desperdicio (Geissdoerfer et al., 2017).

Un ejemplo significativo de residuo agroindustrial con potencial para su aprovechamiento en el marco de la Economía Circular es la cáscara de semilla de girasol (CSG). Este subproducto, generado en grandes cantidades por la industria del aceite de girasol, está compuesto principalmente por celulosa y lignina, lo que lo convierte en un material fibroso y resistente. Su eliminación inadecuada puede generar diversos problemas, como dificultades de almacenamiento, riesgos de incendios y contaminación ambiental.

La fermentación en estado sólido con hongos comestibles y la biodigestión anaeróbica son dos procesos biotecnológicos de valorización de biomasa que pueden integrarse de manera compleja para cumplir con los conceptos propuestos por la Economía Circular. En particular, el cultivo de hongos del género *Pleurotus* ("gírgolas") en sustratos lignocelulósicos, como la CSG, ha ganado popularidad en las últimas décadas debido a sus ventajas en términos de cultivo y aceptación en el mercado. Esta práctica no solo permite la producción de alimentos nutritivos y medicinales, sino que también contribuye a la reducción del impacto ambiental asociado con la eliminación inadecuada de residuos agroindustriales.

Sin embargo, el cultivo de hongos genera a su vez un nuevo residuo: el sustrato residual del cultivo de hongos (SRH). Se estima que, por cada kilogramo de hongo fresco producido, se generan aproximadamente cinco kilogramos de SRH (Pérez-Chavez et al., 2019). Este nuevo subproducto, compuesto por micelio y biomasa lignocelulósica parcialmente degradada, representa tanto un desafío como una oportunidad dentro del marco de la Economía Circular. Los sustratos residuales resultantes de la producción de hongos encuentran diversas aplicaciones como la producción de biofertilizantes y biogás, y la obtención de enzimas para la biorremediación (Hölker et al., 2004; Leong et al., 2022).

El objetivo de este trabajo es evaluar un proceso de aprovechamiento integral de la CSG en un contexto de Economía Circular. Se propone un ciclo que comienza con el uso de la CSG como sustrato para el cultivo de hongos comestibles, seguido por la recuperación de enzimas del sustrato residual para aplicaciones como la decoloración de efluentes. Finalmente, se plantea el uso del sustrato residual como biomasa para la biodigestión anaeróbica, produciendo biofertilizante y biogás que puede ser utilizado en la pasteurización del sustrato inicial para el cultivo de hongos. Este enfoque busca cerrar el ciclo productivo, minimizando la generación de residuos y maximizando la creación de valor a través de la producción de alimentos saludables, enzimas de interés industrial y energía renovable.

Desarrollo

Cultivo de hongos comestibles

El cultivo de hongos del género *Pleurotus* sigue una secuencia de pasos bien definidos, cada uno con sus propios requisitos y procedimientos específicos. Estos hongos, pertenecientes al grupo de la pudrición blanca, cuentan con un conjunto enzimático que les permite crecer en biomasa lignocelulósica sin necesidad de compostaje previo. A este sustrato básico se le pueden añadir suplementos nutricionales y agentes para ajustar el pH. Es esencial que la microbiota presente en el sustrato no compita con el crecimiento del hongo; por ello, generalmente se emplean procesos de pasteurización para reducir la carga microbiana que podría interferir con el desarrollo del micelio.

La fase de corrida del micelio es el momento en el que el micelio se expande desde el inóculo hacia el sustrato. Durante esta etapa, que se realiza en oscuridad, es importante mantener la temperatura adecuada. Este proceso se lleva a cabo íntegramente dentro de la bolsa de plástico cerrada. Una vez que el sustrato ha sido completamente colonizado, se ajustan nuevamente las condiciones ambientales de temperatura, humedad y luz, se realizan aberturas en la bolsa, y comienza el crecimiento de los basidiomas. La producción de hongos generalmente ocurre en ciclos rítmicos conocidos como “oleadas”.

La composición química de la CSG la convierte en un material atractivo para el crecimiento de microorganismos lignocelulolíticos. Se ha reportado el crecimiento de varias especies de hongos en este sustrato con excelentes resultados (Figlas et al., 2016). En el Sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, este residuo es uno de los preferidos por pequeños productores para el cultivo de gírgolas.

El uso de CSG como sustrato para el cultivo de *Pleurotus* representa un primer paso clave en la creación de una Economía Circular para este residuo agrícola. En primer lugar, permite la producción de un alimento saludable y de alto valor en el mercado, con buenos rendimientos. Este enfoque no solo genera valor económico, sino que también responde a la creciente demanda de alimentos sostenibles y funcionales. En segundo lugar, el proceso de cultivo de los hongos biotransforma la CSG, degradando la lignina y enriqueciendo el sustrato con enzimas. Este sustrato residual transformado se convierte así en un material valioso para las siguientes etapas de la cadena circular.

Recuperación de enzimas para su uso en decoloración de efluentes

Los hongos de la pudrición blanca producen una amplia gama de enzimas lignocelulolíticas, conocidas como CAZimas (*carbohydrate active enzymes*), que incluyen celulasas, hemicelulasas y ligninasas. Estas enzimas actúan de manera coordinada para descomponer la matriz lignocelulósica del sustrato (Vela Gurovic et al., 2023).

Después del proceso de fermentación en estado sólido, el sustrato residual biotransformado retiene parte de la actividad ligninolítica del hongo en forma de enzimas segregadas. Estas enzimas, principalmente lacasas y peroxidasas, tienen la capacidad de catalizar reacciones de oxidación de una variedad de compuestos, muchos de los cuales son tóxicos. Esta capacidad las convierte en herramientas valiosas para el tratamiento de efluentes en industrias como la textil y la papelera (Phan y Sabaratnam, 2012).

El protocolo de extracción de las enzimas del SRH se basa en la solubilización y posterior separación de partículas en suspensión, utilizando agua como agente de extracción debido a su seguridad ambiental y eficacia. Para este estudio, se homogeneizaron 15 g de sustrato residual proveniente de un emprendimiento local de cultivo de gírgolas en CSG, en 125 mL de agua durante 30 minutos. Posteriormente, la mezcla se filtró y se centrifugó a 3000 rpm durante 5 minutos, obteniendo un total de 85 mL de extracto enzimático.

Para evaluar la capacidad de decoloración del extracto, se prepararon soluciones de diferentes colorantes, como azul de anilina, verde malaquita y rojo fenol, con concentraciones finales de 127 μM , 22,5 μM y 210 μM , respectivamente. Se añadió 1 mL de extracto enzimático a 3 mL de cada solución de colorante, y adicionalmente, se exploró el potencial del rojo fenol como mediador enzimático en la degradación de azul de anilina y verde malaquita, utilizando una concentración final de 4,25 μM . Todas las muestras se prepararon por triplicado.

La absorbancia de cada colorante se monitoreó a su longitud de onda de máxima absorción a las 0, 1, 2 y 18 horas, calculándose el porcentaje de degradación mediante la fórmula: $(\text{Abs}_0 - \text{Abs}_t) / \text{Abs}_0 \times 100\%$.

Los resultados mostraron una degradación máxima del 62% para el verde malaquita y del 24% para el azul de anilina tras 18 horas de tratamiento, mientras que el rojo fenol no evidenció una decoloración significativa (Figura 1). Además, el rojo fenol, utilizado como mediador, no mostró un efecto considerable en la degradación de los otros colorantes.

Estos hallazgos respaldan la posibilidad de que estos extractos enzimáticos puedan ofrecer una alternativa sostenible y efectiva para el tratamiento de efluentes textiles, contribuyendo a la biorremediación ambiental y a la valorización de residuos agroindustriales.

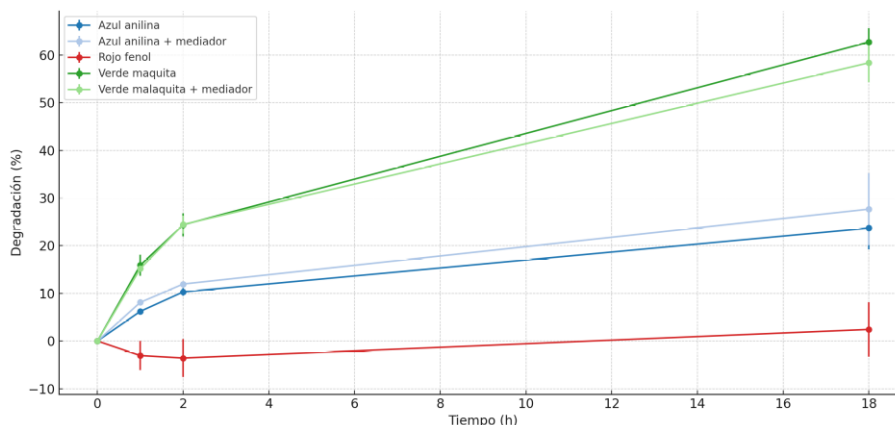


Figura 1: degradación de colorantes con extracto del sustrato residual del cultivo de hongos con y sin rojo fenol como mediador

Digestión anaeróbica del sustrato residual del cultivo de hongos

El SHR presenta un potencial significativo para su aprovechamiento mediante procesos de digestión anaeróbica. Esta técnica emplea bacterias para descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando productos de alto valor energético, biogás, además de un residuo semi-sólido denominado digestato, rico en nutrientes y aplicable como fertilizante agrícola.

La producción de metano por digestión anaeróbica del SHR ha sido ampliamente documentada con resultados prometedores (Pérez-Chávez et al., 2019). No obstante, persisten desafíos como la elevada relación carbono/nitrógeno y la alta digestibilidad del SHR, que pueden afectar negativamente la estabilidad del proceso (Gao et al., 2021). Una estrategia para abordar estos retos es la co-digestión del SHR con otros residuos orgánicos. Esta técnica puede proporcionar un efecto sinérgico al combinar sustratos con características complementarias, potencialmente aumentando la eficiencia del proceso. Además, la co-digestión permite compartir los costos de tratamiento de diferentes residuos en una sola instalación, lo que la convierte en un enfoque más rentable y sostenible.

Para evaluar la capacidad del SRH de producir biogás se hizo codigestión con estiércol bovino (E). Se presentan tres de los ensayos realizados, con distintas relaciones en la cantidad de cada sustrato, en base a experiencias anteriores con otros sustratos (Dietrich et al., 2023).

Los ensayos se realizaron en reactores "batch" de 2000 mL, modificados para permitir la adición o remoción de sustrato. El biogás generado por cada reactor fue almacenado en una probeta de vidrio graduada, midiendo el volumen obtenido por desplazamiento del líquido. Los reactores permanecieron en un baño termostatzado en condiciones termofílicas (55 °C) y se mantuvieron recubiertos para evitar la incidencia de la luz (fermentación oscura), con agitación manual discontinua. El tiempo de digestión fue entre 72 y 96 horas. Para cada ensayo se determinó pH, conductividad eléctrica, materia seca (MS), materia orgánica (MO), sólidos volátiles (SV), según métodos estándar (APHA, 2005). Se utilizaron distintas concentraciones de materia seca (MS), empleando proporciones de 7%, 14% y 21%, respectivamente. Se emplearon tres reactores con diferentes relaciones (E):(SRH): 1:1, 1:2 y 2:1. Los reactores se denominaron A, B y C, respectivamente. Los resultados se presentan en la Tablas 1 y 2.

Reactor	Vol (mL) Ensayo 7% MS	Vol (mL) Ensayo 14% MS	Vol (mL) Ensayo 21% MS
A	560	500	840
B	400	840	770
C	340	310	720

Tabla 1: Volumen total obtenido en cada reactor

Reactor	pH Ensayo 7% MS		pH Ensayo 14% MS		pH Ensayo 21% MS	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
A	9,03	6,82	8,05	6,57	7,08	5,90
B	8,90	6,79	8,07	6,62	7,05	5,79
C	9,15	6,66	8,04	6,56	7,07	6,11

Tabla 2: pH en cada reactor

En todos los casos se observó producción de biogás con descenso del pH. Los mayores volúmenes se observaron a la mayor concentración de materia seca (Tabla 1).

Análisis teórico del uso del biogás en la pasteurización del sustrato

El biogás se compone principalmente de metano y dióxido de carbono, y pequeñas proporciones de otros gases, como vapor de agua, H_2S , H_2 , N_2 , NH_3 y O_2 . La composición del biogás depende del sustrato digerido y de las condiciones de operación, como la temperatura. El poder calórico inferior del biogás es aproximadamente de 5139 kcal/m^3 (Bharathiraja et al., 2018), para un contenido de metano de 60%, lo que representa un 55% del poder calorífico del gas natural.

Previo al uso de la CSG existen diferentes tipos de tratamiento para reducir la carga microbiana y especies que puedan competir con *Pleurotus* como *Sclerotinia sclerotiorum*. Solarización, pasteurización, compostado y desinfección química son utilizados para este propósito, considerándose la pasteurización como el más sencillo (Postemsky et al., 2017).

Los productores del Sudoeste bonaerense utilizan un método sencillo de pasteurización y preparación del sustrato desarrollado por Curvetto et al. (1997) que consiste en introducir una masa de sustrato de 36 kg con una composición final de: 37,5% de CSG, 2,0% de $CaSO_4$, 0,5% de $CaCO_3$ y 60% de agua corriente, al tambor de una mezcladora similar a la utilizada en obras para preparar morteros. Estos componentes se introducen en el tambor como sigue: 13,5 kg de CSG, luego 10 l de agua que contienen 720 g de $CaSO_4$, y 180 g de $CaCO_3$, y finalmente 11,6 l de agua. El proceso de pasteurización siempre se comienza con el calentador a gas encendido y el tambor en una posición estacionaria, durante los primeros 15 minutos. El calor se mantiene por 2,5 horas con el tambor rotando alternadamente durante quince minutos y deteniéndose quince minutos.

El combustible que habitualmente se utiliza en este proceso de pasteurización es gas natural o gas envasado (GLP), pero puede ser reemplazado por biogás ajustando los tiempos experimentalmente en función del poder calorífico de los combustibles y la eficiencia en la transferencia de calor para lograr que la masa alcance los 80°C que garantizan la pasteurización. Adicionalmente, se pueden implementar mecanismos de pasteurización mediante la exposición del sustrato a vapor de agua generado por la combustión de biogás.

Conclusiones

El aprovechamiento integral de la CSG dentro de un marco de Economía Circular demuestra ser una propuesta viable. Este enfoque no solo reduce la cantidad de residuos agroindustriales, sino que también genera productos de valor agregado como alimentos funcionales, enzimas para biorremediación y energía renovable. El proceso comienza con el cultivo de hongos comestibles *Pleurotus* en CSG, seguido por la recuperación de enzimas del sustrato residual con posibles aplicaciones en remediación de efluentes. Un ejemplo de ello es la degradación del 62% del verde malaquita tras 18 horas de tratamiento con un extracto acuoso del sustrato de hongos residual (SHR). Finalmente, el proceso se completa con la digestión anaeróbica del sustrato restante para la producción de biogás y biofertilizante, alcanzando hasta 840 mL de biogás en condiciones de co-digestión con estiércol bovino y un 21% de materia seca. Además, la posibilidad de utilizar el biogás generado en la pasteurización del sustrato inicial cierra el ciclo, ejemplificando un modelo sostenible que integra crecimiento económico y responsabilidad ambiental, alineado con los objetivos de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible.

Referencias

APHA, AWWA and WPCF (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st Edition, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, Washington DC.

Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., & Iyyappan, J. (2018). Biogas production–A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. Renewable and sustainable Energy reviews, 90(April), 570-582.

Curvetto, N. R., Delmastro, S. E., & Devalis, R. J. (1997). A low-cost method for decontaminating sunflower seed hull-based substrate in the cultivation of *Pleurotus* edible mushrooms. Mushroom Research, 6(1).

Dietrich N, Airasca A, Campaña H. (2023). Hidrógeno verde a partir de residuos Agroindustriales. V Congreso de Energías Sustentables de Bahía Blanca ISBN 978-987-8992-15-0.

Figlas, N. D., R, G. M., & Curvetto, N. (2016). Sunflower seed hull: Its value as a broad mushroom substrate. *Annals of Food Processing and Preservation*, 1(1), 1002.

Gao, X., Tang, X., Zhao, K., Balan, V., & Zhu, Q. (2021). Biogas production from anaerobic co-digestion of spent mushroom substrate with different livestock manure. *Energies*, 14(3), 570. <https://doi.org/10.3390/en14030570>

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757-768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

Holker, U., Hofer, M., & Lenz, J. (2004). Biotechnological advantages of laboratory-scale solid-state fermentation with fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 64(2), 175-186. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1504-3>

Leong, Y. K., Ma, T.-W., Chang, J.-S., & Yang, F.-C. (2022). Recent advances and future directions on the valorization of spent mushroom substrate (SMS): A review. *Bioresource Technology*, 344, 126157. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126157>

Pérez-Chávez, A. M., Mayer, L., & Albertó, E. (2019). Mushroom cultivation and biogas production: A sustainable reuse of organic resources. *Energy for Sustainable Development*, 50, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.03.002>

Phan, C.-W., & Sabaratnam, V. (2012). Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 96(4), 863-873. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4446-9>

Postemsky, P. D., Lucaioli, V. S., Devalis, R., González Matute, R., Figlas, N. D., Cubitto, M. A., ... & Curvetto, N. R. (2017, September). Pretratamientos de la cáscara de semilla de girasol para su utilización como sustrato de plantas. In IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico-CONCYT.

Vela Gurovic, M. S., Viceconte, F. R., Bidegain, M. A., & Dietrich, J. (2023). Regulation of lignocellulose degradation in microorganisms. *Journal of Applied Microbiology*, 134(1), lxac002. <https://doi.org/10.1093/jambio/lxac002>