

Residuos de *Opuntia ficus-indica* y estiércol de caballo como insumos de compostaje

Opuntia ficus-indica residues and horse manure as composting inputs

¹Alan Jesús Torres-Sandoval^{ORCID}, ²María Elena Tavera-Cortés^{ORCID}, ¹Yolanda Donají Ortiz-Hernández^{ORCID}

¹Instituto Politécnico Nacional (IPN). Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR), Unidad Oaxaca. Santa Cruz Xoxocotlán-Oaxaca. México. ²IPN. Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Iztacalco-Ciudad de México. México. [§]Autor de correspondencia: (mtavera@ipn.mx).

Resumen

La producción de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) en Milpa Alta, Ciudad de México, superó las 250 000 t durante 2024, de las cuales se ha reportado que más del 60 % del producto no llega al consumidor final, generando grandes volúmenes de residuos vegetales; adicionalmente, esta producción depende del uso intensivo de estiércol de caballo como fertilizante, lo que plantea retos ambientales y productivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el aprovechamiento de los residuos de nopal mediante compostaje. Se recolectaron muestras representativas de ambos materiales y se determinó su contenido de humedad y cenizas mediante secado controlado y calcinación. Los residuos de nopal presentaron alta humedad (89.88 ± 3.63 %) y mayor contenido mineral (10.38 ± 3.65 %), mientras que el estiércol mostró menor humedad (60.2 ± 4.72 %) y bajo contenido de cenizas (2.3 ± 0.4 %). Estas observaciones señalan que la interacción de ambos componentes puede favorecer el equilibrio de humedad y porosidad, contribuyendo a la obtención de compost de calidad.

Palabras clave: fertilización orgánica, nopal verdura, sostenibilidad agrícola, sustrato, valorización.

Abstract

The production of edible nopal (*Opuntia ficus-indica*) in Milpa Alta, Mexico City, exceeded 250 000 t in 2024, reports indicate that more than 60 % of this output does not reach the final

consumer, resulting in the generation of large volumes of plant residues; additionally, this production relies on the intensive use of horse manure as fertilizer, which poses both environmental and productivity challenges. The objective of this study was to evaluate the utilization of nopal residues through composting. Representative samples of both materials were collected, and moisture and ash content were determined through controlled drying and calcination. Nopal residues showed high moisture content (89.88 ± 3.63 %) and higher mineral content (10.38 ± 3.65 %), whereas horse manure exhibited lower moisture (60.2 ± 4.72 %) and low ash content (2.3 ± 0.4 %). These observations indicate that the interaction of both components can enhance the balance of moisture and porosity, thereby contributing to the production of high-quality compost.

Index words: organic fertilization, edible nopal, agricultural sustainability, substrate, valorization.

Introducción

La producción de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) constituye una actividad agrícola de gran importancia en Milpa Alta, Ciudad de México, representa una de las principales fuentes de ingreso para las familias de la región. Históricamente, Milpa Alta lideró la producción nacional; sin embargo, a mediados de la década de 2000 fue superada por el estado de Morelos debido a diversas ineficiencias productivas (Salinas, 2011; SIAP, 2025). A pesar de ello, datos recientes de la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo

Rural (CORENADR, 2024) reportan que la producción anual promedio de nopal verdura en Milpa Alta supera las 204 000 t, lo que equivale a aproximadamente el 22 % de la producción nacional. A nivel nacional, Morelos concentra la mayor producción con 409 208 t, seguido por el Estado de México con 85 478 t (SIAP, 2025). De manera destacada, en 2024 la producción en la Ciudad de México alcanzó 250 000 t (Secretaría de Cultura de la Ciudad de México, 2024), superando el promedio histórico y fortaleciendo la economía de cerca de 7000 familias, además de contribuir de manera significativa a la seguridad alimentaria. A pesar de su importancia, la cadena productiva del nopal enfrenta serios desafíos en materia de sostenibilidad. Uno de los principales es el elevado índice de desperdicio, según estimaciones de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol, 2018) más del 60 % del producto no llega al consumidor final, debido a factores como pérdida postcosecha, problemas de comercialización y descarte por criterios de calidad, problema documentado también en sistemas agrícolas similares (Escamilla-García et al., 2025). Esta situación no solo implica la pérdida considerable de recursos naturales, sino que también impacta negativamente los ingresos de los productores. Adicionalmente, dentro de los retos asociados al sistema productivo, el uso generalizado de estiércol de caballo, a pesar de ser un fertilizante natural, también conlleva riesgos ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero, la posible contaminación por lixiviación y la dependencia de insumos externos (Pinos-Rodríguez et al., 2012; Aguirre-Villegas y Larson, 2017; Umar et al., 2025). Estos factores evidencian la necesidad de replantear las estrategias de manejo de fertilidad del suelo en busca de alternativas más sostenibles.

Frente a este escenario, la valorización de residuos surge como alternativa sostenible. Diversos estudios muestran que los residuos vegetales mejoran la calidad del suelo cuando se incorporan mediante compostaje, al favorecer propiedades como la estabilidad de agregados, la retención de humedad y la disponibilidad de

nutrimentos (Abiven et al., 2009; Kelley et al., 2020). En particular, los residuos de *Opuntia* han demostrado estabilizarse adecuadamente durante el proceso, favoreciendo la actividad microbiana y la obtención de compostar con características adecuadas para uso agrícola, como una mayor estabilidad del material y aporte mineral (Rodas-Gaitán et al., 2019) lo que permite generar compostas adecuadas para uso agrícola (Torres-Sandoval et al., 2025). Su uso conjunto con estiércoles puede aumentar la disponibilidad nutrimental y mejorar la respuesta de los cultivos (Alvarado-Raya et al., 2016; González-Torres et al., 2024).

Estos hallazgos respaldan la viabilidad del uso de residuos vegetales, como el nopal, en prácticas de compostaje. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el aprovechamiento de los residuos de nopal mediante compostaje.

Materiales y métodos

Obtención y caracterización de muestras

La recolección de muestras se llevó a cabo en junio de 2024 en una parcela productiva de nopal ubicada en Milpa Alta, Ciudad de México (19°13'46.3" N, 99°02'14.1" W). Este sitio se caracteriza por una producción intensiva de nopal y la generación de una cantidad considerable de residuos vegetales después de la cosecha (**Figura I**). Se recolectaron cinco pencas de nopal descartadas durante la cosecha, seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico por selección dirigida, al considerarse representativas de los residuos agrícolas generados. Asimismo, se obtuvo una muestra de estiércol de caballo en la misma parcela productiva de nopal, considerada como material de referencia debido a su uso generalizado en las prácticas de fertilización de los sistemas productivos de nopal en Milpa Alta. Posteriormente, las muestras fueron trasladadas al laboratorio de la UAM Iztapalapa en recipientes limpios y cerrados, a temperatura ambiente y el mismo día de su recolección, donde se determinó su contenido de humedad y de cenizas para su caracterización.

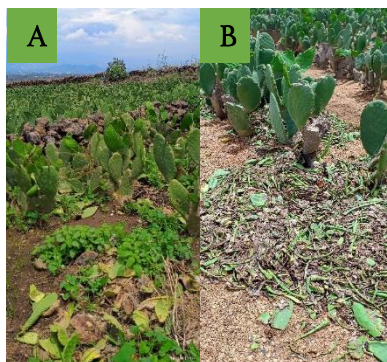


Figura 1. A) Parcela de producción de nopal en Milpa Alta. B) Residuos de pencas de nopal descartadas.

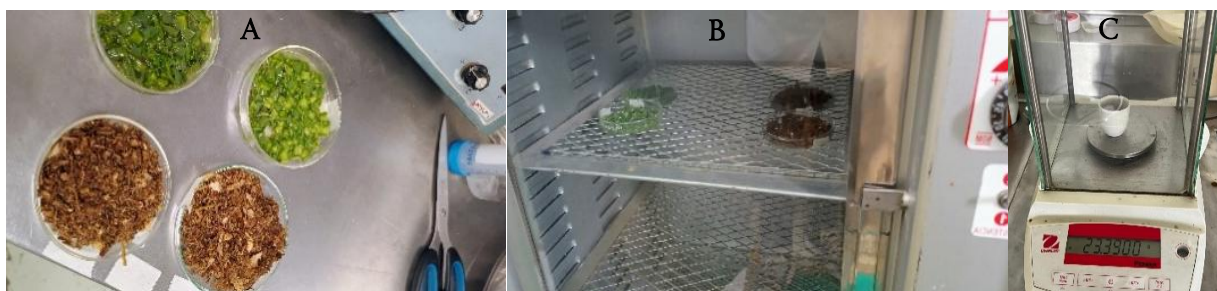


Figura 2. Determinación de humedad. A) preparación de muestras, B) secado y C) pesaje.

Determinación del contenido de humedad

Previamente, las muestras de residuos de nopal y estiércol de caballo fueron acondicionadas para su análisis; en el caso del nopal, se trocó en porciones pequeñas y homogéneas, mientras que el estiércol se homogeneizó manualmente para reducir la variabilidad del material.

Posteriormente, las muestras fueron pesadas para registrar el peso fresco y posteriormente se secaron en una estufa a 50 °C durante 96 h continuas, hasta alcanzar peso constante (Figura 2). La diferencia entre el peso fresco y peso seco permitió calcular el porcentaje de humedad (Ecuación 1).

$$H(\%) = \left(\frac{PF-PS}{PF} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde: H = humedad en base húmeda, PF = peso fresco de la muestra (g), PS = peso seco (g).

Determinación del contenido de cenizas

Las muestras secas obtenidas después de la determinación de humedad fueron sometidas a un proceso de calcinación, utilizando la totalidad del

material remanente de cada muestra. En primer lugar, se aplicó un pretratamiento con llama directa para eliminar restos de materia orgánica superficial. Posteriormente, las muestras fueron introducidas en un horno de mufla a 600 °C durante 4 h, hasta lograr combustión completa (Figura 3). El contenido de cenizas se determinó a partir de la diferencia entre el peso seco inicial y el peso final de cenizas (Ecuación 2).

$$\text{Cenizas} (\%) = \left(\frac{PS-PC}{PS} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: PS = peso seco inicial de la muestra (g), PC = peso final de cenizas obtenido después de la calcinación (g).

Resultados y discusión

Los análisis de humedad y cenizas obtenidos en este estudio constituyen un primer paso para evaluar la viabilidad de los residuos de *Opuntia ficus-indica* y el estiércol de caballo como insumos en procesos de compostaje. Estos parámetros se

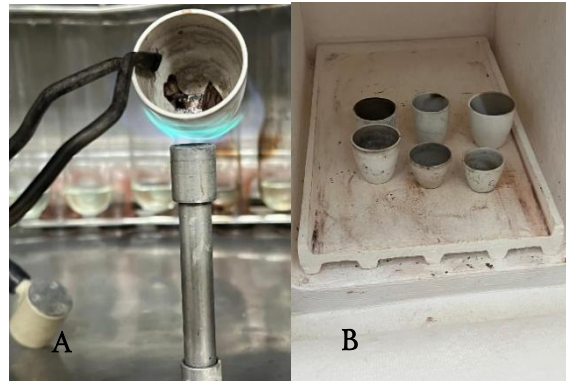


Figura 3. A) Calcinación con llama directa, B) combustión en mufla.

analizaron porque son indicadores clave de la descomposición y de la calidad potencial del compost, ya que influyen en la actividad microbiana, la estabilidad del material y el aporte de nutrientes. El promedio de humedad en la totalidad de muestras fue de 89.88 ± 3.63 %, valor similar a lo reportado por Betancourt-Domínguez et al. (2006) con 91.5 %; Rodríguez-Félix y Cantwell (1988) con 92.0 % en estudios realizados con *Opuntia ficus-indica* y menor a lo señalado por Machado-Velasco y Vélez-Ruiz (2008) 97.79 % de humedad, mientras que Maki-Díaz et al. (2015) registraron valores para consumo nacional (94.56 %) y de exportación (94.84 %).

El elevado contenido de humedad del nopal, aunque representa un desafío técnico, también ofrece una buena oportunidad. Por un lado, una humedad excesiva, si no se maneja adecuadamente puede favorecer condiciones anaeróbicas, lo que puede reducir la actividad microbiana, ralentizar la descomposición y afectar la calidad final del compost. Sin embargo, este mismo factor puede acelerar la descomposición inicial y estimular la actividad microbiana, elementos importantes para una biodegradación eficiente (Kim et al., 2016). En este sentido, Aguilar-Paredes et al. (2023) resaltan la humedad como uno de los factores más influyentes en la sucesión microbiana durante el compostaje, impactando directamente la estabilidad y calidad del producto final. Asimismo, Kim et al. (2016) observaron que mantener niveles de humedad cercanos a la capacidad de retención de agua de los materiales optimiza el consumo de oxígeno y mejora la actividad microbiana aeróbica.

Por su parte, Makan et al. (2013) mencionan que niveles de humedad iniciales alrededor del 75 % pueden ser adecuados para alcanzar temperaturas elevadas y tasas eficaces de descomposición en sistemas con control de aireación, como los biorreactores.

Considerando estos antecedentes, los residuos de nopal exhiben una viabilidad significativa como componente en mezclas para compostaje, especialmente al combinarse con materiales más secos. Su alto contenido de humedad puede aprovecharse estratégicamente para impulsar procesos de compostaje eficientes y sostenibles.

Considerando estos antecedentes, los residuos de nopal exhiben una viabilidad significativa como componente en mezclas para compostaje, especialmente al combinarse con materiales más secos. Su alto contenido de humedad puede aprovecharse estratégicamente para impulsar procesos de compostaje eficientes y sostenibles.

Los residuos de nopal presentaron un contenido de cenizas de 10.38 ± 3.65 %. Estos valores son cercanos a lo reportado por Sepúlveda et al. (2007), quienes encontraron rangos del 10 % al 15 %. Este aporte mineral es relevante, ya que, según Hassan et al. (2024), un compost con contenido significativo de cenizas puede incrementar la fertilidad del suelo, mejorar su capacidad de retención de nutrientes y favorecer la actividad microbiana.

En contraste, el estiércol de caballo utilizado en este estudio presentó un valor promedio de cenizas de 2.3 ± 0.4 %. Este resultado es menor a los encontrados por Lundgren y Pettersson (2009) (5-7 %) y Chong et al. (2019) (10 %). Esta

diferencia probablemente se debe a la alta presencia de aserrín contenido en el estiércol usado en la región. Si bien este tipo de material seco es útil para regular la humedad y aportar estructura al compost, su contenido mineral relativamente bajo podría reducir la riqueza nutricional del producto final.

En este sentido, estudios como el de Dědina et al. (2024) muestran que la adición de cenizas vegetales o minerales durante el compostaje puede modificar significativamente propiedades del compost, como el pH, la densidad aparente y la disponibilidad de nutrientes. En particular, se observó que una mayor fracción de cenizas está asociada con un contenido más alto de minerales, aunque su disponibilidad puede depender de la forma química presente y del pH del medio. Por tanto, el contenido de cenizas no solo actúa como indicador de la fracción inorgánica, sino también como potencial modificador de la calidad final del compost, especialmente en lo que respecta a su valor como fertilizante orgánico.

Conclusiones

Los residuos de *Opuntia ficus-indica* presentan un alto contenido de humedad y niveles de cenizas que favorecen la descomposición y aportan minerales, por lo que constituyen un insumo potencial para la elaboración de compost. Asimismo, el contraste entre la elevada humedad del nopal y la menor humedad del estiércol de caballo sugiere que ambos materiales podrían complementarse para equilibrar la mezcla y mejorar su manejo durante el proceso.

Referencias

Abiven, S., Menasseri, S. & Chenu, C. (2009). The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - A literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015>

Aguilar-Paredes, A., Valdés, G., Aráneda, N., Valdebenito, E., Hansen, F. & Nuti, M. (2023). Microbial community in the

composting process and its positive impact on the soil biota in sustainable agriculture. *Agronomy*, 13(2), 542. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020542>

- Aguirre-Villegas, H. A. & Larson, R. A. (2017). Evaluating greenhouse gas emissions from dairy manure management practices using survey data and lifecycle tools. *Journal of Cleaner Production*, 143, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.133>
- Alvarado-Raya, H. E., Salinas-Callejas, E. & Ortiz-Huerta, G. (2016). Peso fresco y calidad de nopalito (*Opuntia ficus-indica* L.) fertilizado con composta de estiércol de vaca. *Tecnociencia Chihuahua*, 10(1), 58-71. <https://doi.org/10.54167/tch.v10i1.581>
- Betancourt-Domínguez, M. A., Hernández-Pérez, T., García-Saucedo, P., Cruz-Hernández, A. & Paredes-López, O. (2006). Physico-chemical changes in cladodes (nopalitos) from cultivated and wild cacti (*Opuntia* spp.). *Plant Foods for Human Nutrition*, 61(3), 115-119. <https://doi.org/10.1007/s11130-006-0008-6>
- Chong, C., Mong, G., Han, J., Fong, W., Ani, F., Lam, S. & Ong, H. (2019). Pyrolysis characteristics and kinetic studies of horse manure using thermogravimetric analysis. *Energy Conversion and Management*, 180, 1260-1267. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.11.071>
- Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENADR). (30 de octubre de 2025). *Nopales de Milpa Alta, corazón agroecológico de la CDMX*. Gobierno de la Ciudad de México. <https://altepetl.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/nopales-de-milpa-alta-corazon-agroecologico>
- Dědina, M., Petru, V., Čermák, P., Moudrý, J., Mukosha, C. E., Lošák, T., Hrušovský, T. & Watzlová, E. (2024). Environmental life cycle assessment of silage maize in relation to

- regenerative agriculture. *Sustainability*, 16(2), 481. <https://doi.org/10.3390/su16020481>
- Escamilla-García, P. E., Alvarado-Raya, H. E., Caire Alfaro, C., Dorantes Hernández, P. I. & Ángeles Tovar, L. C. (2025). Standardization process for the production of nopal-based (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) compost: A technical and economic analysis. *Compost Science & Utilization*, 32(4), 104-119. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2025.2498334>
- González-Torres, G. Y., Bernardino-Nicanor, Á., Fernández-Ávalos, S., Acosta-García, G., Juárez-Goiz, J. M. S. & González-Cruz, L. (2024). Effects of nopal and goat manure on soil fertility and the growth, yield and physical characteristics of tomato and carrot plants. *Agronomy*, 14(6), 1221. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061221>
- Hassan, M. U., Huang, G., Munir, R., Khan, T. A. & Noor, M. A. (2024). Biochar co-compost: A promising soil amendment to restrain greenhouse gases and improve rice productivity and soil fertility. *Agronomy*, 14(7), 1583. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071583>
- Kelley, A., Wilkie, A. C. & Maltais-Landry, G. (2020). Food-based composts provide more soil fertility benefits than cow manure-based composts in sandy soils. *Agriculture*, 10(3), 69. <https://doi.org/10.3390/agriculture10030069>
- Kim, E., Lee, D.-H., Won, S. & Ahn, H. (2016). Evaluation of optimum moisture content for composting of beef manure and bedding material mixtures using oxygen uptake measurement. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 29(5), 753–758. <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0875>
- Lundgren, J. & Pettersson, E. (2009). Combustion of horse manure for heat production. *Bioresource Technology*, 100(12), 3121–3126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.050>
- Machado-Velasco, K. & Vélez-Ruiz, J. (2008). Estudio de propiedades físicas de alimentos mexicanos durante la congelación y el almacenamiento congelado. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 7(1), 41–54. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI665-27382008000100006&lng=es&tlng=es
- Makan, A., Assobhei, O. & Mountadar, M. (2013). Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 10(1), 3. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-3>
- Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G. & Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia*, 49(1), 31–51. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI405-31952015000100003&lng=es&tlng=es
- Maltais-Landry, G., Bertoni, N., Valley, W., Grant, N., Nestic, Z. & Smukler, S. (2018). Greater impacts of incubation temperature and moisture on carbon and nitrogen cycling in poultry relative to horse manure-based soil amendments. *Journal of Environmental Quality*, 47(4), 919–921. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.11.0420>
- Pinos-Rodríguez, J. M., García-López, J. C., Peña-Avelino, L. Y., Rendón-Huerta, J. A., González-González, C. & Tristán-Patiño, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Agrociencia*, 46(4), 381–392. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SI405-31952012000400004&lng=es&tlng=e
- Rodas-Gaitán, H., Palma-García, J., Olivares-Sáenz, E., Gutiérrez-Castorena, E. & Vázquez-Alvarado, R. (2019). Biodynamic preparations on static pile composting from prickly pear cactus and moringa crop wastes. *Open*

- Agriculture*, 4(1), 247–257.
<https://doi.org/10.1515/opag-2019-0023>
- Rodríguez-Félix, A. & Cantwell, M. (1988). Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition*, 38, 83–93.
<https://doi.org/10.1007/BF01092314>
- Salinas, E. (2011). Sistema y métodos de compostaje: El caso de una planta de compostaje. En M. Tavera & H. Alvarado (Eds.), *La factibilidad tecnológica para la producción de composta en el DF* (pp. 99–123). Instituto Politécnico Nacional
- Secretaría de Cultura de la Ciudad de México. (7 de junio de 2025). *Inaugura Clara Brugada la Feria del Nopal en el Monumento a la Revolución y declara las terrazas agrícolas patrimonio de la ciudad*. Gobierno de la Ciudad de México.
<https://cultura.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/248-25>
- Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol). (2018). *Desperdicio de alimentos en México*.
http://www.sedesol.gob.mx/boletinesSinHambre/Informativo_02/infografia.html
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of Arid Environments*, 68(4), 534–545.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.08.001>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2025). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Gobierno de México.
https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola
- Torres-Sandoval, A. J., Ortiz-Hernández, Y. D., Tavera-Cortés, M. E., Acevedo-Ortiz, M. A. & Lugo-Espinosa, G. (2025). *Closing the Loop in Opuntia Cultivation: Opportunities and Challenges in Residue Valorization*. *Agronomy*, 15(10), 2311.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15102311>
- Umar, M., Akbar, A., Eman, R., Hayat, M. F., Naz, H. & Ashraf, A. (2025). Mitigating nutrient pollution from livestock manure: Strategies for sustainable management. En N. Hussain, C.-Y. Hung, & L. Wang (Eds.), *Agricultural nutrient pollution and climate change: Challenges and opportunities* (pp. 165–187). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-80912-5_6