

## Desempeño ambiental del biodiesel de soja en Argentina desde el enfoque de nexo Agua-Energía-Alimentos

### *Environmental performance of soybean biodiesel in Argentina from the Water-Energy-Food Nexus approach*

Piastrellini, Roxana<sup>1,2</sup>; Kock, Sven,<sup>3</sup>; Arena, Alejandro Pablo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; Argentina

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Mendoza. Grupo CLIOPE; Argentina

<sup>3</sup> Ernst-Abbe University of Applied Sciences; Alemania

DOI: <https://doi.org/10.59872/icu.v8i11.505>

Correo de correspondencia: [roxana.ppp@gmail.com](mailto:roxana.ppp@gmail.com)

Recepción: 17/05/2024; Aceptación: 29/05/2024;

Publicación: 02/07/2024

**Palabras claves:** Biocombustibles; Nexo; Análisis de ciclo de vida; Indicadores de eficiencia; Argentina

**Keywords:** Biofuels; Nexus; Life cycle assessment; Efficiency indicators; Argentina

#### Resumen

Este trabajo expone los principales resultados de una evaluación del nexo Agua-Energía-Alimentos (AEA) bajo el enfoque de ciclo de vida para la producción de biodiesel de aceite de soja en la zona núcleo de Argentina. Se evaluaron dos modelos productivos según dos tecnologías agrícolas: soja de primera (ES) y soja de segunda (LS), ambas en siembra directa. El estudio se realizó considerando un alcance «desde la cuna hasta la puerta», para la unidad funcional «1 MJ de energía entregada por el biocombustible». Para la evaluación de impactos se propuso un enfoque metodológico que considera tres indicadores de eficiencia del nexo: Retorno de la inversión en energía no renovable; Retorno energético de la inversión en agua; y Retorno energético de la inversión en suelo productivo. Los resultados señalan que la energía entregada por el biocombustible es 2,4 veces superior a la energía necesaria para producirlo, siendo LS la tecnología de producción más alentadora. Así mismo, se observa que el sistema LS es el más eficiente en cuanto a la cantidad de energía entregada por unidad de volumen de agua invertida. Por el contrario, ES es más eficiente que LS cuando se considera la relación entre energía entregada y suelo productivo invertido, dado que su rendimiento de cosecha es mayor. Se concluye que el enfoque metodológico propuesto facilita la comprensión de los efectos del biocombustible en los tres componentes del nexo AEA, y que ninguno de los sistemas productivos estudiados es más eficiente que el otro, cuando se consideran los componentes simultáneamente.

#### Abstract

*This paper presents the main results of an evaluation of the Water-Energy-Food (WEF) nexus under the life cycle approach for soybean oil biodiesel production in the core zone of Argentina. Two production models were evaluated according to two agricultural technologies: early (ES) and late soybean (LS), both in no-tillage. The study was carried out considering a «cradle to gate» scope, for the functional unit «1 MJ of energy delivered by the biofuel». For the evaluation of impacts, a methodological approach was proposed that considers three nexus efficiency indicators: Return on investment in non-renewable energy; Return on energy investment in water; and Return on energy investment in productive land. The results show that the energy delivered by the biofuel is 2.4 times higher than the energy required to produce it, with LS being the most promising production technology. It is also observed that the LS system is the most efficient in terms of the amount of energy delivered per unit volume of water invested. On the other hand, ES is more efficient than LS when considering the ratio between energy delivered and productive soil invested, since its harvest yield is higher. It is concluded that the proposed methodological approach facilitates the understanding of the effects of biofuel on the three components of the WEF nexus, and that none of the production systems studied is more efficient than the other, when the components are considered simultaneously.*

## Introducción

Dada la urgente necesidad de diversificar la matriz energética mediante la incorporación de fuentes renovables y bajas en Carbono, existe un gran desarrollo en el sector de la bioenergía, tanto a nivel global como en Argentina. El país ha logrado posicionarse como un importante productor y exportador de biocombustibles, especialmente de biodiesel obtenido a partir de aceite de soja, alcanzando el puesto número 9 en el ranking mundial (REN21, 2021).

A pesar de los reconocidos beneficios de los biocombustibles, existen aún cuestionamientos acerca de la sustentabilidad de su producción, principalmente los que se obtienen a partir de biomasa que suele utilizarse para la alimentación (*first-generation biofuels*), como el biodiesel de aceite de soja o de girasol, o el bioetanol de caña de azúcar o de maíz. Se presenta entonces una competencia directa por biomasa entre la generación de energía y la disponibilidad de alimentos. Tal es así que Mahapatra *et al.* (2021) aseguran que con los cultivos requeridos para producir 1 TJ de energía podrían alimentarse 100 personas, aproximadamente. Por otra parte, existe una competencia indirecta dado que los biocombustibles demandan recursos estratégicos, como agua y suelo, que dejan de estar disponibles para producir alimentos u otros bienes esenciales. Dado que los biocombustibles dependen en gran medida de cultivos agrícolas y que la agricultura consume alrededor del 70% del agua dulce disponible a nivel mundial, es esperable que su desarrollo intensifique la presión sobre el recurso hídrico (Gheewala *et al.*, 2011). Una situación similar puede plantearse para la ocupación de tierras agrícolas. A esto se suma que los biocombustibles requieren energía para su producción, a pesar de que su balance energético es positivo y que contribuyen a la diversificación de la matriz energética actual. Sin dudas, las interacciones de los biocombustibles con los sectores energético, alimentario e hídrico son complejas y la idea de abordarlas a través de un enfoque unificado de nexo Agua-Energía-Alimentos (AEA) ha ganado gran aceptación en diferentes ámbitos. Este enfoque reconoce los intercambios, compensaciones y sinergias entre los tres sectores, facilitando el entendimiento de las implicancias de los biocombustibles en el desarrollo sustentable local y global.

Una de las herramientas utilizadas para evaluar el nexo AEA en sistemas productivos es el Análisis de ciclo de vida (ACV). El ACV es ampliamente utilizado para evaluar los potenciales impactos ambientales asociados a productos o servicios, mediante la cuantificación de las entradas (insumos, materias primas, energía) y salidas (productos, coproductos, emisiones, residuos) en cada una de las etapas de su ciclo de vida (extracción y adquisición de materias primas, fabricación, uso o consumo, fin de vida).

En el sector de los biocombustibles se destaca el trabajo de Ghani *et al.* (2019) quienes evaluaron las implicancias en el uso de agua y suelo del bioetanol de caña de azúcar elaborado en Pakistán. Por su parte, Pacetti *et al.* (2015) estudiaron el nexo agua-energía para la producción de biogás obtenido a partir de tres cultivos energéticos en Italia, con especial atención en los impactos sobre el recurso hídrico. Son aislados los estudios de biocombustibles que abordan los tres componentes de forma simultánea, dado que no se dispone aún de una metodología normalizada que permita analizar cuantitativamente sus relaciones y los impactos sobre los ecosistemas que les dan soporte.

Este trabajo expone los principales resultados de una evaluación del nexo AEA para la producción de biodiesel de aceite de soja en la zona núcleo de Argentina. Para esto se planteó un marco metodológico que considera tres indicadores de eficiencia de nexo, construidos bajo el enfoque de ciclo de vida.

## Materiales y métodos

### Indicadores de eficiencia de nexo AEA

El estudio del comportamiento ambiental de los biocombustibles requiere indicadores que posibiliten cuantificar la relación entre el agua, la energía y los alimentos, considerando los intercambios y/o compensaciones que ocurren en las distintas etapas de la cadena de producción que se está evaluando.

En este trabajo se evalúa el biodiesel de aceite de soja mediante dos indicadores de eficiencia de nexo recomendados por Armengot *et al.* (2021): Retorno de la inversión en energía no renovable (EROI) y Retorno energético de la inversión en agua (EROWI). Además, se propone un tercer indicador llamado Retorno energético de la inversión en suelo productivo (EROPL), para la relación alimentos-energía.

EROI relaciona la energía entregada por el combustible (EO) con la energía directa e indirecta necesaria para producirlo (EI), proveniente de fuentes no renovables (Hall *et al.*, 2014), como establece la Ecuación 1:

$$EROI = \frac{EO (MJ)}{EI (MJ)} \quad (\text{Ec. 1})$$

EROWI relaciona EO con la Huella de agua por escasez (WSF) (Ecuación 2). WSF considera el potencial relativo de privación de agua, tanto para los seres humanos como para los ecosistemas, y puede evaluarse con el método AWARE (*Available Water Remaining*) (Boulay *et al.*, 2018).

$$EROWI = \frac{EO (MJ)}{WSF (m^3 H_2O eq)} \quad (\text{Ec. 2})$$

EROPL relaciona EO con el Potencial de producción biótica (BPP) (Ecuación 3). BPP mide las condiciones actuales de la tierra que determinan su capacidad a corto, mediano y largo plazo para producir y sostener biomasa útil, como ser la biomasa alimenticia (Brandão y Milà i Canals, 2013).

$$EROPL = \frac{EO (MJ)}{BPP (kg C eq)} \quad (Ec. 3)$$

**Caso de estudio**

Se realizó un ACV para el biodiesel de aceite de soja elaborado en Argentina, con alcance «desde la cuna hasta la puerta». Se definió como unidad funcional «1 MJ de energía entregada por el biocombustible».

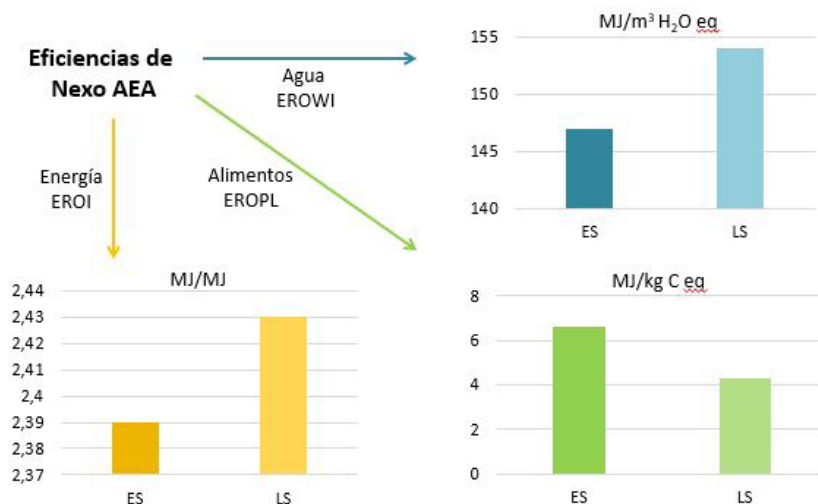
Se evaluaron dos modelos productivos representativos de la zona sojera núcleo del país, según dos tecnologías agrícolas: soja de primera (ES) y soja de segunda (LS), ambas en siembra directa. Los procesos incluidos en esta etapa fueron: la ocupación del suelo, la siembra, el manejo de nutrientes, el manejo de plagas y enfermedades, las emisiones directas del suelo y la cosecha. La etapa industrial se elaboró teniendo en cuenta las tecnologías más utilizadas en Argentina: extracción de aceite por solventes y transesterificación alcalina. Los procesos incluidos fueron el secado del grano, la extracción del aceite, la desolventización de la harina, la destilación de micelas, la recuperación de disolventes y la transesterificación para obtener biodiesel y glicerol. Se consideró una planta industrial localizada en el Puerto San Lorenzo-General San Martín. Los co-productos incluidos fueron la harina, la glicerina y la lecitina de soja. La asignación de cargas ambientales se realizó según el criterio energético. Los datos directos fueron extraídos de Piastrellini *et al.* (2015; 2017), Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos [CIAFA] (2022; 2021) y Nemecek y Kägi (2007). Las emisiones directas se calcularon siguiendo las recomendaciones de Nemecek *et al.* (2019). Los datos de procesos indirectos se tomaron de las bases Ecoinvent y Agri-Footprint (por ejemplo, manufactura de agroquímicos, fabricación de equipos y procesos de transporte).

**Resultados**

Los resultados hallados muestran que el sistema que demanda menor cantidad de energía (EI) (Tabla 1) para producir el biocombustible es LS, lo cual se traduce en un mayor valor de EROI (2,39 para ES frente a 2,43 para LS) (Figura 1).

**Tabla 1.** Energía requerida (EI), Huella de agua (WF) y Potencial de producción biótica (BPP) para los sistemas de producción de biodiesel de aceite de soja

Sistema de producción	EI (kWh/UF)	WSF (m <sup>3</sup> eq/UF)	BPP (C eq/UF)
ES	0,12	0,007	0,15
LS	0,11	0,006	0,23



**Figura 1.** Indicadores de eficiencia de nexus AEA para los sistemas de producción de biodiesel de aceite de soja

Por otra parte, el sistema LS tiene asociado un menor impacto por escasez de agua (WSF) (Tabla 1), consecuentemente el valor de EROWI (154 MJ/m<sup>3</sup> eq) es superior al del sistema ES (147 MJ/m<sup>3</sup> eq) (Figura 1).

En cuanto al potencial de producción de biomasa útil (BPP), se destaca que es notablemente superior en el sistema ES (Tabla 1), lo que se traduce claramente en un mejor valor de EROPL (6,62 MJ/kg C eq) frente al sistema LS (4,30 MJ/kg C eq) (Figura 1).

### Discusión

El desarrollo de los biocombustibles introduce nuevos desafíos dentro del nexo AEA: ocupan agua, energía, biomasa y grandes extensiones de tierras productivas. Por lo tanto, tomar decisiones en el sector de la bioenergía centrándose únicamente en el aspecto energético podría ocasionar impactos de gran relevancia sobre los otros componentes del nexo. El presente trabajo facilita la comprensión del nexo AEA para el biodiesel de aceite de soja elaborado en la zona núcleo de Argentina y sus efectos sobre el ambiente desde una perspectiva de ciclo de vida.

Las características del sistema de producción de soja tienen incidencia en la eficiencia del biodiesel en cuanto al uso de recursos y sus impactos asociados. Esta incidencia es mucho más notoria cuando se considera la relación entre energía entregada y suelo productivo invertido, con una diferencia de 35% en la eficiencia lograda, a favor del sistema ES. Esto se debe, por un lado, a que ES alcanza un mejor rendimiento de cosecha por superficie cultivada y, por otro lado, a que el grano cosechado en el sistema ES presenta mayor contenido en aceite que el grano de LS.

Por otra parte, el sistema LS resulta un 5% más eficiente en cuanto a la cantidad de energía entregada por unidad de volumen de agua invertida. En ambos casos, gran parte del impacto sobre la escasez de agua proviene de la producción de metanol usado en la transesterificación del aceite, del transporte del grano hasta la planta de extracción y de la producción de glifosato aplicado en la etapa agrícola. Estos resultados, al igual que los estudios de Faist Emmenegger *et al.* (2011) y de Araujo *et al.* (2019), corroboran que el impacto por escasez de agua se debe en gran medida al uso indirecto del recurso, es decir al consumo de agua durante la producción de inputs.

Tanto en ES como en LS, la energía entregada por el biocombustible es aproximadamente 2,4 veces superior a la energía necesaria para producirlo (directa + indirecta). Este valor se encuentra en el rango de EROI publicado previamente para otros sistemas productivos de biodiesel de soja en Argentina (Piastrellini *et al.*, 2017). Se destaca que LS es 1% más eficiente que ES en cuanto a la demanda de energía. Esto es porque la adopción de LS implica menor cantidad de agroquímicos, lo cual se traduce en una reducción de la demanda de energía acumulada en la etapa de manufactura de inputs. Lo anterior confirma que los mejores rendimientos en producción no siempre se traducen en beneficios ambientales.

### Conclusiones

El presente trabajo constituye la primera aproximación de la evaluación del nexo Agua-Energía-Alimentos para el biodiesel de soja argentino, considerando indicadores de ciclo de vida para impactos relacionados con el agua, el suelo y la demanda de energía. A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el enfoque metodológico propuesto facilita la comprensión de los efectos del biocombustible en los tres componentes del nexo, y que ninguno de los sistemas productivos estudiados es más eficiente que el otro, cuando se consideran los componentes de forma simultánea.

### Referencias Bibliográficas

- Armengot, L., Beltrán, M. J., Schneider, M., Simón, X., & Pérez-Neira, D. (2021). Food-energy-water nexus of different cacao production systems from a LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 304, 126941. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126941>.
- Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A., ... & Ridoutt, B. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368-378. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1333-8>.
- Brandão, M., & i Canals, L. M. (2013). Global characterization factors to assess land use impacts on biotic production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(6), 1243-1252. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0381-3>.
- Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos-CIAFA (2022). Consumo de fertilizantes en el agro 2022. <https://www.ciafa.org.ar/files/MP2gUtcEjTJDcpjmQNZlwf1lAOXWsp72pMLX2nOQ.pdf>.
- Cámara de la Industria Argentina de Fertilizantes y Agroquímicos-CIAFA (2021). Fitosanitario. <https://www.ciafa.org.ar/info-fitosanitario-mercado>.
- Ghani, H. U., Silalertruksa, T., & Gheewala, S. H. (2019). Water-energy-food nexus of bioethanol in Pakistan: A life cycle approach evaluating footprint indicators and energy performance. *Science of the total environment*, 687, 867-876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.465>.
- Gheewala, S. H., Berndes, G., & Jewitt, G. (2011). The bioenergy and water nexus. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(4), 353-360. <https://doi.org/10.1002/bbb.295>.
- Hall, C. A., Lambert, J. G., & Balogh, S. B. (2014). EROI of different fuels and the implications for society. *Energy policy*, 64, 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>.
- Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., & Sachan, P. K. (2021). Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, 4, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100036>.
- Nemecek, T., Kägi, T., (2007). *Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems (No. 15)*, Ecoinvent Report. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zürich & Dübendorf.
- Nemecek T., Bengoa X., Lansche J., Roesch A., Faist-Emmenegger M., Rossi V. & Humbert S. (2019). *Methodological Guidelines for the Life Cycle Inventory of Agricultural Products. Version 3.5*, December. 2019. World Food LCA Database (WFLDB). Quantis and Agroscope, Lausanne and Zurich, Switzerland.
- Pacetti, T., Lombardi, L., & Federici, G. (2015). Water-energy Nexus: a case of biogas production from energy crops evaluated by Water Footprint and Life Cycle Assessment (LCA) methods. *Journal of Cleaner Production*, 101, 278-291. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.084>.
- Piastrellini, R., (2015). *Aportes a la Determinación de la Huella Ambiental de Biocombustibles en Argentina. Influencia de los Sistemas de Manejo de Cultivos sobre el Impacto del Consumo de Agua, del Uso del Suelo y de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para el Biodiésel de Soja* (Tesis de Doctorado). Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina.
- Piastrellini, R., Arena, A. P., & Civit, B. (2017). Energy life-cycle analysis of soybean biodiesel: Effects of tillage and water management. *Energy*, 126, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.028>.
- REN21 (2021). *Renewables Global Status Report*. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>