

La Integración Agrícola y Pecuaria Como Herramienta Para la Mejora de la Circularidad: Análisis Energético

Arnulfo Domínguez-Hernández¹, Elisa Domínguez-Hernández^{1,3}, Martha Elena Domínguez-Hernández² y Rosalba Zepeda-Bautista¹

¹ Posgrado en Ingeniería de Sistemas, Sección de Estudios de Posgrado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 07738, México; adhmed@gmail.com (A.D.-H); rzepedab@ipn.mx (R.Z.-B)

² Departamento de Ciencias Agrícolas, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, 54714, México; marthadominguez@comunidad.unam.mx, marthaedohe@gmail.com (M.D.-H)

³ Departamento de Matemáticas, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli, 54714, México; elisa.dominguez@cuautitlan.unam.mx (E.D.-H).

Resumen— Las prácticas agrícolas sostenibles garantizan la seguridad alimentaria y reducen el impacto ambiental. Este estudio evaluó sistemas agropecuarios con distinto nivel de integración: Monocultivo de maíz + Ganado (SC), Maíz + Cultivo de cobertura + Pradera mixta + Ganado (SI-2) y Maíz + Trébol rojo + Pradera mixta + Ganado (SI-1), analizando su aporte a la circularidad y sostenibilidad. Los sistemas más integrados (SI-1 y SI-2) mejoraron la eficiencia energética ($P < 0.05$) y redujeron la dependencia de insumos sintéticos, aunque requieren más mano de obra y conocimientos técnicos, dificultando su adopción por pequeños productores. La sinergia entre agroecología y circularidad impulsa una intensificación sostenible y fortalece la resiliencia económica, ambiental y social, destacando el potencial transformador de los sistemas integrados.

Palabras Clave — Circularidad, Eficiencia Energética, Carga de Trabajo, Sistemas Integrados, Sustentabilidad

Abstract- Sustainable agricultural practices ensure food security and reduce environmental impact. This study evaluated farming systems with different integration levels: Maize Monoculture + Livestock (SC), Maize + Cover Crop + Mixed Prairie + Livestock (SI-2), and Maize + Red Clover + Mixed Prairie + Livestock (SI-1), analyzing their contribution to circularity and sustainability. Highly integrated systems (SI-1 and SI-2) improved energy efficiency ($P < 0.05$) and reduced reliance on synthetic inputs but required more labor and technical knowledge, limiting adoption by small farmers. The synergy between agroecology and circularity drives sustainable intensification and strengthens economic, environmental, and social resilience, highlighting the transformative potential of integrated systems.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe la necesidad de un aumento en la producción de alimentos, dado el crecimiento poblacional. Así, la agricultura se impone como el mecanismo histórico de producción de alimentos que tiene el desafío de mejorar la seguridad alimentaria, reduciendo el impacto al ambiente. Estos desafíos pueden ser logrados con una transición a una producción agropecuaria sustentable [1, 2]. Los sistemas

agropecuarios circulares se diferencian de los sistemas basados en la economía lineal, pues, en los primeros, se intenta encontrar un ciclo cerrado en el uso de recursos, lo que reduce los desechos y promueve su reutilización en otros sistemas[3, 4, 5].

Los sistemas integrados (SI) tienen relación con la circularidad, ya que tienen una diversidad de subsistemas que pueden aprovechar mejor los recursos, p.ej. el aprovechamiento de la biomasa producida por los cultivos como alimento de uso animal, donde los residuos animales se reintegran al suelo agrícola como fertilizante[6, 7, 8]. El manejo integrado de cultivos y ganado es una herramienta en la producción, y asegura el mejoramiento económico, ambiental y social [9, 10, 11].

El pastoreo facilita la integración de sistemas, a través de la conversión de biomasa de cultivos en alimento de consumo humano, un sistema de pastoreo integrado requiere de la implementación de técnicas que permitan, tanto al cultivo como al animal, estar en las mejores condiciones para producir, por ejemplo, las técnicas de rotación donde se promueve la recuperación de los pastos y suelo a través del descanso en las praderas después del paso de los animales [12, 13, 14].

En el presente trabajo se estudian distintos niveles de integración en tres sistemas y su impacto en el uso y distribución de la energía: Maíz monocultivo con ganado sin praderas de pastoreo (SC), Maíz dentro de cobertura de trébol rojo con praderas en pastoreo (SI-1) y Maíz seguido de cultivo de pradera dentro de un cultivo de cobertura (SI-2), para evaluar su desempeño en un atributo de la circularidad: la eficiencia y distribución energética.

II. METODOLOGÍA/DESARROLLO

A. Ubicación geográfica

La comunidad de Laguna Seca, Ahuazotepec, Pue. (20°01'51" N y 98°07'15" O) fue el sitio de estudio de la investigación. Se trata de una zona rural con una altitud de 2268 msnm y un clima templado húmedo. Durante los años 2021 y 2022, la temperatura media fue de 14.1 °C y 13.5 °C,

respectivamente, mientras que la precipitación acumulada fue de 1050.1 mm y 851.8 mm. Estos valores fueron registrados en la unidad de producción con una estación Vantage VUE (Davis Instruments, Hayward, EE. UU.). La granja ha sido descrita previamente en [15].

B. Descripción de los sistemas evaluados

Se establecieron y evaluaron tres sistemas de producción en la unidad de producción: Maíz + Cultivo de cobertura + Pradera mixta (SI-2) y Maíz + Trébol rojo + Pradera mixta (SI-2), ambos integrados con ganadería en pastoreo (bovinos de carne y leche). Como referencia, se estableció un monocultivo de maíz (SC) sin integración de pastoreo. Los sistemas SI-1 y SI-2 presentan un nivel de integración medio-alto, en los cuales el maíz se cultiva y el ganado se maneja en pastoreo rotacional en parcelas con praderas y/o cultivos intercalados o de cobertura; además, el estiércol se utiliza como fertilizante. El sistema SC tiene un nivel de integración bajo-medio, pues el maíz se cultiva en monocultivo y el ganado se mantiene en un área confinada con acceso limitado a los campos de cultivo. En este sistema, la alimentación del ganado incluye subproductos agrícolas y el estiércol se emplea como fertilizante.

Los sistemas de producción (tratamientos) fueron organizados en un diseño de bloques al azar con tres repeticiones (unidades experimentales) por tratamiento. Cada unidad experimental abarcó 1000 m², con una parcela útil de 900 m², de la cual se tomaron muestras aleatorias para la evaluación de todos los cultivos.

C. Descripción de cultivos y ganado

Maíz: Se cultivó una variedad nativa conocida localmente como Elotero azul/negro, en las parcelas de los sistemas SI-1, SI-2 y SC, con una densidad de siembra de 62,500 plantas por hectárea y una separación entre hileras de 0.8 m. La siembra se realizó el 20 de mayo de 2021 y el 25 de mayo de 2022 para el segundo ciclo. La fertilización se llevó a cabo 20 días después, aplicando 7.5 t ha⁻¹ de estiércol ovino compostado (54 % de materia seca, 26.5 g kg⁻¹ de nitrógeno, 5.0 g kg⁻¹ de fósforo y 7.5 g kg⁻¹ de potasio), obtenido en la unidad de producción. Los ovinos utilizados fueron machos con un peso vivo promedio de 40 kg, alimentados con una mezcla seca de 1.4 kg compuesta por 35 % de sorgo, 20 % de cascarilla de soya, 43 % de heno y 2 % de premezcla mineral, estabulados sobre cama de aserrín. La cosecha del maíz se realizó seis meses después de la siembra: entre el 25 de noviembre y el 1 de diciembre de 2021 para el primer ciclo, y entre el 29 de noviembre y el 5 de diciembre de 2022 para el segundo ciclo. Este segundo ciclo solo se estableció en el sistema SC.

Trébol rojo (*Trifolium pratense*): Se sembró al voleo después del cultivo de maíz, el 20 de mayo de 2021, con una densidad de 8 kg ha⁻¹. Para calcular el rendimiento de forraje en cada parcela, se realizaron cosechas manuales en seis cuadrantes de 0.36 m². La primera cosecha tuvo lugar seis meses después de la siembra, entre el 25 de noviembre y el 1 de diciembre de 2021.

Cultivo de cobertura: Se sembró al voleo el 24 de diciembre de 2022, utilizando una mezcla de 60 kg ha⁻¹ de leguminosas y gramíneas compuesta por 30 kg de cebada (*Hordeum vulgare*), 12.5 kg de veza común (*Vicia sativa*), 2.5 kg de veza vellosa (*Vicia villosa*) y 2.5 kg de nabo forrajero (*Brassica napus*). La cosecha se realizó cuatro meses después de la siembra, el 26 de abril de 2022. Se recolectaron manualmente seis cuadrantes de 0.36 m² en cada parcela para determinar el rendimiento y la composición del forraje.

Pradera mixta: Para las parcelas SI-2, se sembró una mezcla de leguminosas y gramíneas con 10 kg ha⁻¹ de Ryegrass (*Lolium multiflorum*) y 2.5 kg de trébol rojo (*Trifolium pratense*). En las parcelas SI-1, se incorporaron únicamente 10 kg ha⁻¹ de Ryegrass en las praderas ya establecidas con trébol rojo. El primer pastoreo se llevó a cabo cuatro meses después de la siembra, el 26 de abril de 2022. Posteriormente, se realizaron tres ciclos de pastoreo adicionales el 26 de mayo, 26 de junio y 26 de julio, respectivamente. Los últimos dos períodos de pastoreo ocurrieron el 26 de octubre y el 26 de diciembre de 2022. En cada ciclo de pastoreo, se recolectaron manualmente seis cuadrantes de 0.36 m² para determinar el rendimiento y la composición del forraje.

Manejo de suelos y riego: En los sistemas de cultivo, los terrenos fueron labrados mecánicamente antes de la siembra del maíz. Después de la cosecha del maíz, se realizó una pasada con rotocultor para la siembra al voleo del cultivo de cobertura o de la pradera mixta. El riego solo se aplicó entre noviembre y mayo en las praderas mixtas, después de cada pastoreo, con una lámina bruta de 13 cm por hectárea. Durante el resto del año, los requerimientos hídricos fueron cubiertos por la precipitación.

Ganadería: En las unidades experimentales de los sistemas SI-2 y SI-1, se manejó ganado en pastoreo para la producción de carne y leche entre abril y diciembre de 2022. Para la producción de carne, se utilizaron machos de ocho meses con un peso promedio de 332 ± 16 kg, los cuales fueron pesados al inicio y al final del período de pastoreo para determinar su ganancia de peso. Para la producción de leche, se emplearon vacas de cuatro años con un peso vivo entre 450 y 550 kg, las cuales fueron ordeñadas mecánicamente una vez al día durante el período de estudio (2021 y 2022). Además del forraje consumido en pastoreo, se suplementaron con 2 kg diarios de grano de maíz por animal, suministrado en el ordeño

D. Evaluación de la circularidad en la unidad de producción

La evaluación de la circularidad fue realizada sólo en el eje energético, para lo cual se utilizaron dos indicadores: Eficiencia energética (EE) y Distribución energética (DE), lo cual evalúa el flujo de energía en el sistema, de acuerdo con el marco de evaluación de [16]. Adicionalmente se incorporaron dos indicadores para considerar la aportación del sistema en la seguridad alimentaria y el bienestar del productor y su familia.

EE fue estimada en cada sistema como en [17] usando los equivalentes energéticos para cada una de las entradas y salidas del sistema (Tabla 1).

Tabla 1. Equivalentes energéticos de las entradas y salidas del sistema de producción.

Ítem	Unidad	Equivalentes energéticos (MJ unidad ⁻¹)	Referencia
Entradas			
Combustible (Diésel)	L	36	[1]
Combustible (Gasolina)	L	32.2	[58]
Electricidad	Día	0.00036	Medición directa
Trabajo humano vigoroso	h	1.67	[2]
Trabajo humano ligero	h	0.73	[59]
Estiércol*	kg	0.3	[3]
Semilla de maíz	kg	18.7	[4]
Semilla de trébol rojo	kg	18.4	[5]
Semilla de cebada	kg	18.6	[6]
Semilla de veza común	kg	18.6	[7]
Semilla de veza vellosa	kg	18.6	[64]
Semilla de nabo	kg	28	[8]
Semilla de Ryegrass	kg	18	[9]
Maquinaria	h	62.7	[60]
Salidas			
Grano de maíz*	kg	18.7	[61]
Rastrojo de maíz*	kg	18.2	[10]
Leche	kg	2.8	[11]
Carne	kg	10.6	[68]
Forraje de pradera mixta* ¹	kg	18.3	[5,9,12]
Forraje de cultivo de cobertura* ¹	kg	17.8	[6,7,12-14]
Forraje de trébol rojo*	kg	18.4	[5]
Estiércol*	kg	0.3	[60][4]

*Base seca. ¹Valor promedio considerando la composición del cultivo

La distribución de la energía fue medida dentro de la unidad de producción y se clasificó en dos categorías: Fuentes de energía renovable (ER) que incluye semillas, carga de trabajo y estiércol; y en fuentes no renovables (ENR) que comprenden maquinaria, combustibles y energía eléctrica. La carga de trabajo fue dividida en dos categorías, trabajo vigoroso y trabajo ligero. Los tiempos en cada proceso agrícola y pecuario fueron medidos y se obtuvo la carga de trabajo total.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los sistemas SI-1 y SI-2 fueron más eficientes energéticamente que SC (EE = 25.1), generando 75.3 y 57 MJ por MJ consumido, respectivamente ($P < 0.05$, Figura 1). El 55-59% del consumo energético provino de combustibles fósiles usados en cultivos y ordeño (Tabla 2).

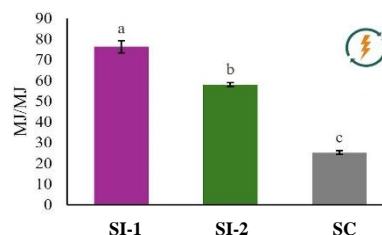


Figura 1. Eficiencia energética de sistemas agropecuarios.

SI-1 y SI-2 consumieron 246.8-998.9 MJ más que SC por el pastoreo y ordeño (Tabla 3). La energía no renovable representó 74.9% en SC, 75.5% en SI-1 y 70.6% en SI-2 (Tabla 1). SI-2 tuvo mayor energía renovable por su diversidad vegetal (Tabla 1). Los recursos internos fueron mano de obra, estiércol y semilla de maíz; los demás insumos fueron externos (Tabla 1).

Tabla 2. Consumo de energía en diferentes sistemas, ciclo primavera-verano 2021 y 2022.

Item	SC	SI-1	SI-2
	MJ consumidos		
Diesel ^{NR, E}	2998.8	3498.6	3498.6
Gasolina ^{NR, E}	2778.3	2778.3	2778.3
Electricidad ^{NR, E}	0	0.097	0.097
Trabajo vigoroso ^{R, I}	213.8	106.9	106.9
Trabajo ligero ^{R, I}	234.3	479.2	425.6
Maquinaria ^{NR, E}	2006.4	1755.6	1755.6
Estiércol ^{R, I}	1215	1215	1215
Semilla de Maíz ^{R, I}	935	467.5	467.5
Semilla T. rojo ^{R, E}	0	147.2	46
Semilla de cebada ^{R, E}	0	0	558
Semilla Veza comun ^{R, E}	0	0	232.5
Semilla de veza invernal ^{R, E}	0	0	46.5
Semilla Colza ^{R, E}	0	0	70
Ryegrass semilla ^{R, E}	0	180	180

SI-1: Maíz + Trébol rojo + Pradera mixta, SI-2: Maíz + Cultivo de cobertura + Pradera mixta. El consumo de energía incluye todos los insumos utilizados en los dos ciclos de producción para cada sistema. **NR** = Recurso no renovable, **R** = Recurso renovable, **E** = Recurso externo, **I** = Recurso interno.

El aumento en el consumo de energía se explica con la transición hacia sistemas diversificados, implicando mayor número de actividades y mayor requerimiento energético, por lo que es recomendable el uso de estiércol como fuente adicional de energía (biogás a electricidad)[18]. La carga de trabajo aumenta con el aumento en la integración de los sistemas, mientras que para el SC 449 horas fueron requeridas, para SI-1 y SI-2, la carga total fue de 720.5 y 647 horas, respectivamente, donde la carga de trabajo vigoroso representa un 36% en SC, comparado con SI-1 y SI-2, donde representa sólo el 8 y 9%, respectivamente. El aumento de la carga de trabajo resulta obvio, dado que los sistemas con mayor número de actividades requieren de mayor tiempo de labor, pero, entre más tecnificado el sistema, requerirá menor cantidad de trabajo vigoroso, en contraste, el aumento en la productividad genera también el recurso necesario para cubrir los gastos extras de estos aumentos de carga laboral, esto encuadra con hallazgos de otros investigadores [19, 20]

IV. CONCLUSIONES

Durante la experiencia de esta investigación fue posible demostrar que el aumento en el nivel de integración genera, no sólo, incrementos en la productividad, sino también mejora la circularidad del sistema haciendo más eficiente el uso de recursos y reduciendo los residuos, lo cual también mejora la sostenibilidad agropecuaria multidimensional, ya que la diversificación de actividades provoca un aumento en la productividad, genera fuentes de empleo y reduce el impacto de las actividades primarias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la UNAM y al IPN por el apoyo institucional brindado para la realización del estudio. Asimismo, expresan su reconocimiento a los productores participantes de Ahuazotepec por sus contribuciones materiales y de mano de obra en el experimento de campo.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por la UNAM (Proyectos: CI 2454 y UNAM-DGAPA-PAPIME PE211224), el IPN (Proyecto: SIP20241630) y CONAHICYT-SECIHTI (Becas 1152947 y 534775).

REFERENCIAS

- [1] J. N. Pretty *et al.*, "Resource-conserving agriculture increases yields in developing countries," 2006. doi: 10.1021/es051670d.
- [2] H. C. J. Godfray *et al.*, "The Challenge of Food Security," *Science* (1979), vol. 327, no. February, p. 812, 2012, doi: 10.4337/9780857939388.
- [3] I. J. M. De Boer and M. K. Van Ittersum, "Circularity in agricultural production," *Wageningen University*, pp. 1–74, 2018, [Online]. Available: https://www.wur.nl/upload_mm/7/5/5/14119893-7258-45e6-b4d0-e514a8b6316a_Circularity-in-agricultural-production-20122018.pdf
- [4] M. L. Tseng, A. S. F. Chiu, C. F. Chien, and R. R. Tan, "Pathways and barriers to circularity in food systems," *Resour Conserv Recycl*, vol. 143, no. December 2018, pp. 236–237, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2019.01.015.
- [5] B. Basso *et al.*, "Enabling circularity in grain production systems with novel technologies and policy," *Agric Syst*, vol. 193, p. 103244, 2021, doi: 10.1016/j.agsy.2021.103244.
- [6] D. W. Archer, J. G. Franco, J. J. Halvorson, K. P. Pokharel, U. Agricultural, and N. Great, *Integrated Farming Systems*, 2nd ed. Elsevier Inc., 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10562-7.
- [7] S. C. Phatak, "An Integrated Sustainable Vegetable Production System," *HortScience*, vol. 27, no. 7, pp. 738–741, 2019, doi: 10.21273/hortsci.27.7.738.
- [8] S. L. Young, S. K. Pitla, F. K. Van Evert, J. K. Schueller, and F. J. Pierce, "Moving integrated weed management from low level to a truly integrated and highly specific weed management system using advanced technologies," *Weed Res*, vol. 57, no. 1, pp. 1–5, 2017, doi: 10.1111/wre.12234.
- [9] M. P. Costa, J. C. Schoeneboom, S. A. Oliveira, R. S. Viñas, and G. A. de Medeiros, "A socio-eco-efficiency analysis of integrated and non-integrated crop-livestock-forestry systems in the Brazilian Cerrado based on LCA," *J Clean Prod*, vol. 171, pp. 1460–1471, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.063.
- [10] J. R. Hendrickson, J. D. Hanson, D. L. Tanaka, and G. Sassenrath, "Principles of integrated agricultural systems : Introduction to processes and definition," vol. 23, no. 4, 2008, doi: 10.1017/S1742170507001718.
- [11] C. A. Edwards, T. L. Grove, R. R. Harwood, and C. J. Pierce Colfer, "The role of agroecology and integrated farming systems in agricultural sustainability," *Agric Ecosyst Environ*, vol. 46, no. 1–4, pp. 99–121, 1993, doi: 10.1016/0167-8809(93)90017-J.
- [12] W. D. Willms, J. F. Dormaar, B. W. Adams, and H. E. Douwes, "Response of the Mixed Prairie to Protection from Grazing," *Journal of Range Management*, vol. 55, no. 3, pp. 210–216, 2002, doi: 10.2307/4003125.
- [13] L. C. Pinheiro Machado Filho, H. L. S. Seó, R. R. Daros, D. Enriquez-Hidalgo, A. V. Wendling, and L. C. Pinheiro Machado, "Voisin rational grazing as a sustainable alternative for livestock production," Dec. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/ani11123494.
- [14] J. M. Iglesias-Gómez, J. M. A. Domínguez-Escudero, Y. Olivera-Castro, H. B. Wencom-Cárdenas, M. de la C. Milera-Rodríguez, and O. C. Toral Pérez, "Producción de carne de res en sistema de pastoreo racional Voisin," *Pastos y Forrajes*, vol. 45, 2022, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269173684012>
- [15] A. Dominguez-Hernandez, M. E. Dominguez-Hernandez, E. Dominguez-Hernandez, and R. Zepeda-Bautista, "Comparing the Sustainability and Circularity of Two Livestock Production Systems in the Sierra Norte of Puebla, Mexico," *MDPI AG*, Nov. 2023, p. 3. doi: 10.3390/ieag2023-15384.
- [16] K. Koppelmäki, J. Helenius, and R. P. O. Schulte, "Nested circularity in food systems: A Nordic case study on connecting biomass, nutrient and energy flows from field scale to continent," *Resour Conserv Recycl*, vol. 164, no. July 2020, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105218.
- [17] M. E. Dominguez-Hernandez, R. Zepeda-Bautista, M. del C. Valderrama-Bravo, E. Dominguez-Hernandez, and C. Hernandez-Aguilar, "Sustainability assessment of traditional maize (*Zea mays* L.) agroecosystem in Sierra Norte of Puebla, Mexico," *Agroecology and Sustainable Food Systems*, vol. 42, no. 4, pp. 383–406, 2018, doi: 10.1080/21683565.2017.1382426.
- [18] K. Koppelmäki, T. Parviainen, E. Virkkunen, E. Winquist, R. P. O. Schulte, and J. Helenius, "Ecological intensification by integrating biogas production into nutrient cycling: Modeling the case of Agroecological Symbiosis," *Agric Syst*, vol. 170, pp. 39–48, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.agsy.2018.12.007.
- [19] N. Patrizi, V. Niccolucci, C. Castellini, F. M. Pulselli, and S. Bastianoni, "Sustainability of agro-livestock integration: Implications and results of Emery evaluation," *Science of the Total Environment*, vol. 622–623, pp. 1543–1552, May 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.029.
- [20] J. Rangel *et al.*, "Is the increase of scale in the tropics a pathway to smallholders? Dimension and ecological zone effect on the mixed crop-livestock farms," *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 15, no. 2, 2017, doi: 10.5424/sjar/2017152-9561.