



2. Desempeño ambiental, huella de carbono y potencial de economía circular en una planta de alimentos balanceados en Entre Ríos, Argentina: un estudio de caso

Environmental Performance, Carbon Footprint, and Circular Economy Potential in a Feed Mill in Entre Ríos, Argentina: A Case Study

Desempenho ambiental, pegada de carbono e potencial de economia circular em uma fábrica de alimentos balanceados em Entre Ríos, Argentina: um estudo de caso

Nancy Hoffmann

Facultad de Ciencias Económicas y de la Administración
Universidad Adventista del Plata
Libertador San Martín, Argentina
nancy.hoffmann@uap.edu.ar
<https://orcid.org/0009-0004-9912-9724>

Recibido: 2 de junio de 2025

Aceptado: 12 de agosto de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56487/czhgs582>

Resumen

Este estudio evalúa integralmente el desempeño ambiental y el potencial de profundización de la economía circular en una planta de alimentos balanceados (1000 t/mes de producción) en Entre Ríos, Argentina. La metodología combinó análisis cuantitativos (flujos de materia/energía, huella de carbono parcial de alcances 1 y 2 y transporte de alcance 3) y cualitativos (análisis de ciclo de vida conceptual), utilizando datos primarios de la organización (escenario con 50 % de materias primas propias bajo agricultura regenerativa y 50 % externas) y fuentes secundarias. Los resultados indican que la planta ya implementa prácticas sostenibles clave, como la agricultura regenerativa parcial y la recirculación total del polvo de proceso. La huella de carbono parcial se estimó en ~82,21 t CO₂e/mes (82,21 kg CO₂e/tonelada de producto); dentro de esta medición, el transporte total de alcance 3 (materias primas y producto terminado) representa el mayor contribuyente (53,9 %), seguido por el consumo de electricidad (alcance 2; 35,0 %). No obstante, se concluye que el mayor impacto potencial e incertidumbre residen en las emisiones de producción de materias primas externas no cuantificadas (riesgo de cambio de uso de suelo). Se identificaron oportunidades significativas en eficiencia energética, gestión de residuos, sostenibilidad de la cadena de suministro externa y, estratégicamente, en la reformulación con subproductos locales. Se confirma la viabilidad de profundizar la economía circular y la agricultura regenerativa, y se recomiendan un ACV completo y estudios de viabilidad para las mejoras.



Palabras claves

Economía circular — Alimentos balanceados — Sostenibilidad agroindustrial — Huella de carbono — Agricultura regenerativa — Análisis de ciclo de vida

Abstract

This study comprehensively evaluates the environmental performance and the potential for deepening the circular economy in a feed mill (1000 t/month production) in Entre Ríos, Argentina. The methodology combined quantitative (material/energy flows, partial carbon footprint of scopes 1, 2 and transport of scope 3) and qualitative (conceptual life cycle assessment) analyses, using primary data from the organization (scenario with 50% of own raw materials under regenerative agriculture and 50% external) and secondary sources. The results indicate that the plant already implements key sustainable practices, such as partial regenerative agriculture and total recirculation of process dust. The partial carbon footprint was estimated at ~82.21 t CO₂e/month (82.21 kg CO₂e/ton of product); within this metric, scope 3 total transportation (raw materials and finished product) represents the largest contributor (53.9%), followed by electricity consumption (scope 2; 35.0%). However, it is concluded that the greatest potential impact and uncertainty resides in unquantified external raw material production emissions (land use change risk). Significant opportunities were identified in energy efficiency, waste management, external supply chain sustainability and, strategically, in reformulation with local by-products. The feasibility of deepening the circular economy and regenerative agriculture was confirmed, recommending a full LCA and feasibility studies for improvements.

Keywords

Circular economy — Animal feed — Agro-industrial sustainability — Carbon footprint — Regenerative agriculture — Life cycle analysis

Resumo

Este estudo avalia de forma abrangente o desempenho ambiental e o potencial de aprofundamento da economia circular em uma fábrica de ração (produção de 1.000 t/mês) em Entre Ríos, Argentina. A metodologia combinou análises quantitativas (fluxos de material/energia, pegada de carbono parcial dos escopos 1 e 2 e transporte do escopo 3) e qualitativas (avaliação conceitual do ciclo de vida), usando dados primários da organização (cenário com 50% de matérias-primas próprias sob agricultura regenerativa e 50% externas) e fontes secundárias. Os resultados indicam que a fábrica já implementa práticas sustentáveis importantes, como a agricultura regenerativa parcial e a recirculação total da poeira do processo. A pegada de carbono parcial foi estimada em ~82,21 t CO₂e/mês (82,21 kg CO₂e/tonelada de produto); dentro dessa métrica, o transporte total do escopo 3 (matérias-primas e produto acabado) representa o maior contribuinte (53,9%), seguido pelo consumo de eletricidade (escopo 2, 35,0%). Entretanto, conclui-se que o maior impacto potencial e a maior incerteza estão nas emissões externas não quantificadas da produção de matérias-primas (risco de mudança no uso da terra – LUC). Oportunidades significativas foram identificadas na eficiência energética, no gerenciamento de resíduos, na sustentabilidade da cadeia de suprimentos externa e, estrategicamente, na reformulação com subprodutos locais. A viabilidade de aprofundar a economia circular e a agricultura regenerativa é confirmada, e uma LCA completa e estudos de viabilidade para melhorias são recomendados.

Palabras-chave

Economía circular — Alimentos balanceados — Sustentabilidad agroindustrial — Pegada de carbono — Agricultura regenerativa — Análisis del ciclo de vida

Introducción

La industria de producción de alimentos balanceados para animales es un componente esencial de la cadena agroalimentaria global. Provee la nutrición necesaria para la producción de proteína animal (carne, leche, huevos, pescado) destinada al consumo humano (FAO, 2018). Su desempeño impacta directamente en la seguridad alimentaria, la economía del sector agropecuario y, de manera creciente, en la sostenibilidad ambiental. A nivel global, el sistema alimentario es responsable de entre el 21 % y el 37 % de las emisiones antropogénicas totales de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019) y ejerce una presión considerable sobre recursos naturales como la tierra y el agua (FAO, 2017). Dentro de este sistema, la producción de alimentos balanceados puede representar entre el 50 % y el 80 % de la huella de carbono total de la producción de carne de cerdo y aves de corral. Los impactos ambientales asociados a esta industria son diversos y significativos e incluyen presiones sobre el cambio climático, la biodiversidad, el uso de la tierra (a menudo vinculado con la deforestación por cultivos como la soja), los ciclos biogeoquímicos y los recursos hídricos (Garnett, 2011; Mottet et al., 2017). En este contexto, la transición hacia modelos productivos más sostenibles, que integren los principios de la economía circular y la agricultura regenerativa, se ha vuelto una prioridad ineludible (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Las pequeñas y medianas empresas (en adelante, PyMEs) del sector de alimentos balanceados en Argentina enfrentan múltiples desafíos para transitar hacia la sostenibilidad. Estos incluyen la dependencia de materias primas agrícolas convencionales con una huella ambiental considerable (asociada al riesgo de cambio de uso de suelo y al uso intensivo de agroquímicos), un consumo energético a menudo no optimizado y dependiente de fuentes fósiles, una generación de residuos que no siempre se gestionan bajo un enfoque de valorización y una limitada capacidad de inversión en tecnologías limpias o sistemas de gestión ambiental robustos. Adicionalmente, existe una falta de información local detallada sobre los impactos ambientales específicos y una capacidad limitada para aplicar herramientas como el análisis de ciclo de vida de forma exhaustiva. Si bien existen estudios de análisis de ciclo de vida y huella de carbono para productos genéricos (Franetovich et al., 2020), hay una brecha en estudios de caso integrales de PyMEs agroindustriales argentinas que evalúen simultáneamente su desempeño operativo, prácticas de agricultura regenerativa, potencial de circularidad y huella ambiental, y que propongan mejoras adaptadas.

Justificación

El estudio se enmarca en los conceptos de análisis del ciclo de vida para evaluar impactos ambientales (Finnveden et al., 2009; ISO, 2006b), la huella de carbono como indicador de emisiones de gases de efecto invernadero (Pandey et al., 2011), la economía circular como modelo restaurador que busca mantener el valor de productos y materiales (Ellen MacArthur Foundation, 2013) y la agricultura regenerativa, enfocada en restaurar la salud del ecosistema y del suelo (Giller et al., 2021; Rhodes, 2017). El análisis de casos específicos de plantas productoras de alimentos balanceados es crucial para comprender sus particularidades operativas y desafíos, lo que permite identificar oportunidades de mejora concretas y adaptadas. Este tipo de investigación proporciona datos primarios valiosos para la gestión empresarial y la formulación de políticas públicas de fomento a la sostenibilidad. El presente estudio en Entre Ríos, Argentina, es pertinente dada la vocación agroindustrial de la provincia y la disponibilidad

potencial de subproductos valorizables en esquemas de economía circular. Los hallazgos pueden servir de referencia para otras PyMEs y para el diseño de estrategias regionales de desarrollo sostenible.

Objetivos

El objetivo general de este estudio es evaluar integralmente el desempeño ambiental de una planta productora de alimentos balanceados en Entre Ríos, Argentina, incluyendo la estimación de su huella de carbono parcial y la identificación del potencial para implementar prácticas de economía circular y sostenibilidad, con el fin de proponer estrategias de mejora concretas.

Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Realizar un diagnóstico integral del desempeño ambiental actual de la planta, caracterizar sus procesos productivos, flujos de materia y energía, gestión del agua y prácticas de agricultura regenerativa implementadas, e identificar sus principales aspectos e impactos ambientales.
2. Estimar y analizar detalladamente la huella de carbono parcial de la planta (alcances 1 y 2 y transporte de alcance 3), investigando la contribución relativa de sus componentes principales —incluida la producción de materias primas (análisis cualitativo y de riesgo), el consumo de energía operativa y las emisiones de transporte— y explorando el potencial predominio del alcance 3.
3. Evaluar el potencial de la planta para profundizar prácticas de economía circular y sostenibilidad, con énfasis en la valorización de subproductos agroindustriales locales, la optimización de la agricultura regenerativa y la identificación de oportunidades de mejora y barreras existentes.
4. Proponer un conjunto de estrategias de mejora operativas y estratégicas viables, y definir para ellas objetivos, indicadores clave, su vinculación con la economía circular y un análisis preliminar de sus beneficios y obstáculos para fomentar una transición hacia una mayor sostenibilidad en la planta.

Marco teórico y revisión de literatura

Este estudio se fundamenta en varios conceptos clave para la evaluación ambiental y la sostenibilidad en la agroindustria. El análisis del ciclo de vida (en adelante, ACV) es una metodología estandarizada (ISO 14.040:2006 e ISO 14.044:2006), empleada para evaluar los impactos ambientales potenciales de un producto, proceso o servicio a lo largo de toda su existencia, desde la extracción de materias primas (“cuna”) hasta su disposición final o reintegración en un nuevo ciclo (“tumba” o “nuevo ciclo”). Un ACV se desarrolla en cuatro fases interdependientes: definición del objetivo y alcance, análisis del inventario del ciclo de vida (en adelante, ICV), evaluación del impacto del ciclo de vida e interpretación de los resultados. Esta herramienta es crucial para identificar *hotspots* ambientales y evitar la transferencia de cargas ambientales entre las diferentes etapas del ciclo de vida o categorías de impacto.

La huella de carbono (en adelante, HC) es un indicador derivado del ACV que cuantifica la totalidad de gases de efecto invernadero (en adelante, GEI) emitidos directa o indirectamente por un producto, servicio u organización. Se expresa en dióxido de carbono equivalente (CO₂e), utilizando el potencial de calentamiento global para comparar diferentes GEI. Su cálculo se rige por estándares como el GHG Protocol y la norma ISO 14.067:2018, que clasifican las emisiones en tres alcances (en inglés, *scopes*): alcance 1 (emisiones directas controladas por la entidad), alcance 2 (emisiones indirectas por consumo de energía adquirida) y alcance 3 (todas las demás emisiones indirectas en la cadena de valor). La precisión de la HC depende de la correcta aplicación de la fórmula *emisiones = dato de actividad × factor de emisión* y de la selección de factores de emisión representativos.

El cambio de uso del suelo (en adelante, LUC) se refiere a la alteración de la cobertura terrestre por actividades humanas, como la conversión de ecosistemas naturales en tierras de cultivo. Este proceso —especialmente la deforestación— puede generar emisiones sustanciales de GEI, principalmente CO₂. Se distingue entre LUC directo (dLUC) e indirecto (iLUC). El LUC es un factor crítico y metodológicamente complejo en la HC de materias primas agrícolas como la soja, y su omisión puede subestimar significativamente los impactos.

Muchos procesos agroindustriales generan múltiples productos con valor económico (coproductos), lo que requiere asignar (*allocation*) las cargas ambientales del proceso compartido entre ellos. La norma ISO 14.044:2006 establece una jerarquía para esta asignación: evitarla, usar relaciones físicas o, como última opción, relaciones económicas. La elección del método impacta en la HC de los coproductos; en el caso de los alimentos balanceados para animales, las reglas de categoría de huella ambiental de producto (PEFCR Feed) suelen recomendar la asignación económica incentivando el uso de subproductos y promoviendo la economía circular.

La agricultura regenerativa es un enfoque sistémico orientado a restaurar y mejorar la salud del ecosistema, con especial énfasis en el suelo, la biodiversidad y la resiliencia climática. Sus principios clave incluyen minimizar la alteración del suelo, mantenerlo cubierto, fomentar la diversidad de cultivos, mantener raíces vivas y reducir o eliminar insumos sintéticos. Estas prácticas buscan aumentar la materia orgánica del suelo, el secuestro de carbono, optimizar el ciclo del agua y reducir la dependencia de insumos externos, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola.

La economía circular se presenta como una alternativa al modelo lineal tradicional de “extraer-fabricar-usar-desechar”. Se define como un sistema restaurador y regenerativo por diseño, que busca mantener los productos, componentes y materiales en su máxima utilidad y valor en todo momento (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Sus principios fundamentales incluyen: diseñar para eliminar residuos y contaminación desde el origen, mantener productos y materiales en uso extendiendo su vida útil y regenerar sistemas naturales (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Las diversas estrategias de la economía circular a menudo se resumen en las “R” (p. ej., reducir, reutilizar, reparar, reciclar) (Kirchherr et al., 2017). En el sector agroindustrial, la economía circular ofrece oportunidades significativas para valorizar subproductos y residuos, optimizar el uso de recursos (agua, energía, nutrientes) y minimizar el impacto ambiental (Jurgilevich et al., 2016).

Metodología

Se realizó un estudio de caso único, descriptivo, con un enfoque metodológico mixto, que combinó análisis cuantitativos (flujos de materia/energía, HC parcial) y cualitativos (ACV conceptual, estrategias de mejora), apropiado para la comprensión profunda del contexto (Yin, 2018). La unidad de análisis fue una planta productora de alimentos balanceados en Entre Ríos, Argentina (“la planta estudiada” o “la organización”). Sus características operativas clave (datos de la organización) incluyen: producción de ~1000 t/mes; procesos principales como recepción, molienda, mezclado, peletizado y embolsado; energía eléctrica (ENERSA) y gas natural (GASNEA). Se analiza un escenario con 50 % de materias primas (en adelante, MP) agrícolas principales (maíz, soja, trigo) provenientes de campos propios (<30 km, agricultura regenerativa con *Vicia* sp.) y 50 % de MP externas. Posee un sistema de recuperación de polvo que reutiliza el 100 % del material capturado (~22.01 t/mes). El producto se envasa en bolsas de polipropileno de 25 kg y se distribuye en un radio promedio de 300 km.

La unidad funcional es una tonelada (1000 kg) de alimento balanceado promedio producido y entregado al cliente. Se adopta una perspectiva de ACV conceptual *cradle-to-customer-gate*, que incluye: producción de MP (módulo A1, cultivo regenerativo propio y datos secundarios para externas, con

incertidumbre por el LUC); transporte de MP a la planta (módulo A2); procesamiento en planta (módulo A3: energía, envases, gestión de residuos); y transporte del producto terminado al cliente (módulo A4). El uso y el fin de vida (módulos B y C) se discuten cualitativamente.

Los datos primarios (consumos energéticos, producción, formulaciones, origen de las MP, procesos, recuperación de polvo, envases, prácticas regenerativas y gestión de residuos) se obtuvieron de la organización. Los datos secundarios provinieron de literatura científica, bases de datos LCI (Ecoinvent, GFLI), factores IPCC y nacionales, e información sobre subproductos regionales. El análisis de datos incluyó: cuantificación de flujos de materia/energía; evaluación de aspectos e impactos ambientales (matriz de significación); cálculo de la HC parcial (alcances 1 y 2 y componentes de A3) mediante la fórmula $HC = \text{dato de actividad} \times \text{factor de emisión}$; análisis cualitativo del ACV y evaluación conceptual de la gestión del agua (ISO 14.046).

Resultados

Para una producción mensual de 1000 toneladas de alimento balanceado (escenario con un 50 % MP propias/regenerativas y un 50 % externas), las entradas mensuales al sistema comprenden 1022,01 toneladas de materias primas vírgenes (la mitad proveniente de campos propios bajo agricultura regenerativa a <30 km y la otra mitad de proveedores externos; principalmente maíz, soja, trigo, pellets de alfalfa, sal, carbonato, vitaminas y minerales). Adicionalmente, se consumen 6 toneladas de envases (bolsas de polipropileno) y recursos como 100 m³ de agua, 82.100 kWh de electricidad y 4470 m³ de gas natural. Un flujo interno relevante es la recuperación y reincorporación al proceso de aproximadamente 22,01 toneladas mensuales de material particulado.

Las salidas principales son 1000 toneladas de producto terminado, mermas netas de proceso (~22.01 t/mes), residuos sólidos (envases de MP, RSU; se asume que las seis toneladas de envases de producto terminado se convierten en residuo), efluentes líquidos (~100 m³ de agua residual), además de emisiones atmosféricas mínimas y calor residual no cuantificado.

La evaluación ambiental identificó los siguientes impactos prioritarios: el asociado a las MP externas (50 % del suministro), por el riesgo del LUC si la soja no tiene origen certificado libre de deforestación y por el uso de recursos y agroquímicos en agricultura no gestionada directamente; el consumo de energía eléctrica (~82,1 MWh/mes), por su magnitud y contribución a la HC (alcance 2); el transporte del producto terminado (alcance 3), por las emisiones de GEI y las distancias promedio (~300 km); y los impactos en la etapa de uso del alimento balanceado (emisiones indirectas y eutrofización potencial).

Otros impactos, como el transporte de MP externas (~250 km), el consumo de gas natural, la generación de residuos sólidos, las emisiones de material particulado (muy controladas por filtros y recirculación al 100 %), el consumo y vertido de agua y la generación de ruido, se consideraron moderados o significativos, pero parcialmente controlados. Las fortalezas mitigantes clave son la agricultura regenerativa en el 50 % de las MP propias y la recirculación total del polvo de proceso.

La HC parcial mensual (alcances 1 y 2 y transporte A3) se estimó en aproximadamente 82,21 t CO₂e (véase la tabla 1), lo que equivale a 82,21 kg CO₂e/tonelada de producto. El alcance 1 (gas natural) aportó 9,16 t CO₂e/mes (11,1 %), el alcance 2 (electricidad), 28,74 t CO₂e/mes (35,0 %); y el transporte de alcance 3 (incluyendo las MP propias y externas y el producto terminado), 44,31 t CO₂e/mes (53,9 %).

Es crucial destacar que esta HC es significativamente incompleta, ya que omite las emisiones de la producción de MP (alcance 3), que probablemente constituyen el componente más grande e incierto, y que incluyen emisiones de N₂O por fertilizantes, CH₄, energía para maquinaria, producción de pesticidas y, de forma crítica, el cambio de uso del suelo (LUC y iLUC). El 50 % de las MP externas —si incluye

soja de zonas de deforestación sin certificar— podría añadir una carga de HC varias veces superior a la calculada (Fearnside, 2000; Gibbs et al., 2010).

La agricultura regenerativa en el 50 % propio mitiga parte de este impacto, pero su beneficio (incluyendo el potencial secuestro de C) no está cuantificado en esta HC parcial. Otras categorías de alcance 3, como la producción de envases y la gestión final de residuos, también contribuyen y no fueron incluidas. Los *hotspots* identificados en la HC parcial son el transporte del producto terminado (36,5 %), la electricidad (35,0 %) y el transporte de las MP externas (15,5 %). El mayor riesgo y *hotspot* no medido reside en la producción de las MP externas.

Tabla 1

Estimación de la huella de carbono parcial mensual (escenario 50/50 MP)

Componente de la HC	Cálculo	Resultado (t CO ₂ e/mes)	% de HC parcial
Alcance 1 (gas natural)	$4470 \text{ m}^3 \times 0,00205$ t CO ₂ e/m ³	9,16	11,10 %
Alcance 2 (electricidad)	$82.100 \text{ kWh} \times 0,00035$ t CO ₂ e/kWh	28,74	35,00 %
Alcance 3 (transporte):			
Transporte de MP propias (511,005 t; <30 km)	Estimado	1,53	1,90 %
Transporte de MP externas (511,005 t; ~250 km)	Estimado	12,78	15,50 %
Transporte del producto terminado (1000 t; ~300 km)	Estimado	30	36,50 %
Subtotal transporte alcance 3		44,31	53,90 %
HC parcial total (A1 + A2 + A3 transporte)	$9,16 + 28,74 + 44,31$	82,21	100,00 %

Nota. Factores de emisión genéricos: gas natural ~2,05 kgCO₂e/m³ (adaptado de IPCC, supuestos de composición y poder calorífico); electricidad (mix Argentina) ~0,35 kgCO₂e/kWh (valor referencial variable). Cálculos de transporte basados en estimaciones de factores de emisión por t-km.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de la organización y factores de emisión de fuentes secundarias.

Desde una perspectiva cualitativa del ciclo de vida, el análisis de las etapas revela diversos aspectos ambientales clave. En la etapa de aguas arriba (MP y transporte), la autoproducción del 50 % de las MP principales bajo agricultura regenerativa y con logística corta (<30 km) constituye una fortaleza que reduce significativamente el impacto ambiental de esta fracción. No obstante, el 50 % restante de las MP externas —especialmente la soja no trazable y sin certificación libre de deforestación— representa un alto riesgo debido al LUC y a prácticas agrícolas no controladas, además del impacto asociado a su transporte.

En la fase de manufactura, la recirculación interna del 100 % del polvo generado y el uso de gas natural se destacan como fortalezas. Entre las debilidades u oportunidades de mejora se identifican el consumo de energía eléctrica (un *hotspot*), la gestión de residuos de envases y RSU, el potencial tratamiento y reutilización del agua residual, y la necesidad de un control constante de emisiones fugitivas de polvo.

En la etapa aguas abajo (distribución, uso del producto y fin de vida de los envases), el transporte del producto terminado constituye un contribuyente importante a la HC. Asimismo, la eficiencia

nutricional del alimento impacta en las emisiones durante la fase de uso animal, y la gestión de los envases posconsumo representa otro factor ambiental significativo.

La gestión actual del agua en la planta, evaluada conceptualmente según los principios de la norma ISO 14.046, registra un consumo mensual aproximado de 100 m³ (provenientes de pozos propios y de la red pública), destinados principalmente a operaciones de limpieza, generación de vapor y servicios sanitarios. Si bien una categorización formal de este nivel de consumo como “bajo” requeriría una comparación con *benchmarks* específicos para plantas de alimentos balanceados de escala similar en la región —datos que exceden el alcance de este estudio—, se observa que los usos principales del agua en la planta no implican su incorporación masiva como insumo directo en el proceso de transformación del producto, a diferencia de lo que ocurre en industrias típicamente catalogadas por su uso intensivo de agua.

Se generan alrededor de 100 m³ mensuales de agua residual (principalmente de limpieza, purgas de caldera y sanitarios), que se asume que son tratados conforme a la normativa local. No se identificaron prácticas de reutilización en el escenario base. Los impactos potenciales incluyen el consumo de agua fresca y el riesgo de contaminación de cuerpos de agua si los efluentes no reciben un tratamiento adecuado. Aunque no se cuantificó en este estudio, la huella hídrica de las MP suele constituir el componente dominante del impacto hídrico total (Hoekstra & Mekonnen, 2012). Las prácticas de agricultura regenerativa en tierras propias contribuyen a optimizar el uso del agua verde. Entre las oportunidades detectadas se encuentran la instalación de medidores, los programas de detección de fugas, la optimización de la limpieza, las auditorías de agua y los estudios de viabilidad para el tratamiento y la reutilización de efluentes o la cosecha de agua de lluvia.

La organización ha incorporado prácticas de agricultura regenerativa en la mitad de las tierras destinadas a maíz, soja y trigo, siendo central el uso de *Vicia* (*Vicia villosa* o *Vicia sativa*) como cultivo de cobertura invernal. Los beneficios identificados son múltiples: fijación biológica de nitrógeno (con la consecuente reducción de fertilizantes sintéticos); mejora de la salud del suelo (aumento de materia orgánica, mejora de la estructura, mayor retención de agua y nutrientes, y aumento de la actividad biológica); control de erosión y potencial secuestro de carbono; supresión de malezas (reducción del uso de herbicidas); mejora del ciclo hidrológico (mayor infiltración) y aumento de la biodiversidad. Estas prácticas probablemente se complementan con labranza mínima o siembra directa. Para la planta, ello se traduce en reducción de costos de insumos, mayor resiliencia productiva, menor huella ambiental de las MP propias, alineación con demandas de sostenibilidad y contribución a la regeneración ecosistémica.

La planta estudiada evidencia una aplicación activa de los principios de la economía circular, con potencial de profundización. Actualmente, se destaca la gestión del material particulado recuperado (~22 t/mes), que se valoriza íntegramente como MP en un cierre de bucle interno ejemplar. Resulta crucial asegurar la calidad e inocuidad del material reciclado. La agricultura regenerativa en tierras propias también representa una forma de circularidad, al cerrar ciclos de nutrientes y regenerar la salud del suelo.

A futuro, existen oportunidades para intensificar la valorización de flujos: los envases (~6 t/mes de bolsas) podrían gestionarse mediante reciclaje —lo que requeriría optimizar la segregación y establecer acuerdos con gestores— o mediante la evaluación de sistemas retornables (*big bags*); los RSU orgánicos podrían transformarse en compost y los inorgánicos podrían destinarse a reciclaje; y las aguas residuales (~100 m³/mes) podrían tratarse y reutilizarse para usos no potables, previa realización de estudios de viabilidad.

La propuesta de mayor impacto potencial es la incorporación de subproductos agroindustriales locales en la formulación, mediante la integración de “residuos” de otras industrias como insumos valorizables. Esta estrategia permitiría generar esquemas de simbiosis industrial, reducir la dependencia de recursos vírgenes y optimizar el uso de recursos a escala regional. En conjunto, estas acciones fortalecen el modelo de economía circular adoptado por la organización.

Propuestas de mejora y estrategias de sostenibilidad

Para mejorar el desempeño ambiental y profundizar la circularidad, se proponen diversas líneas de acción. Se destaca una iniciativa estratégica de gran alcance, complementada por un conjunto de mejoras operativas. Si bien se identifican varias acciones susceptibles de implementación —como la optimización continua de la gestión del material particulado y de las emisiones fugitivas, la implementación de un programa de eficiencia energética, la gestión integral de residuos sólidos, la optimización de la gestión del agua, el fortalecimiento de la sostenibilidad en la cadena de suministro de proveedores externos, la optimización logística del producto terminado y el fortalecimiento y monitoreo de las prácticas de agricultura regenerativa propias—, el enfoque principal para una transformación significativa recae en la iniciativa estratégica que se desarrolla a continuación.

Las mejoras operativas se presentan de forma sintética con el fin de priorizar la propuesta de mayor potencial transformador.

Evaluación de reformulación con subproductos agroindustriales locales

Más allá de las mejoras operativas, se identifica una propuesta estratégica con un potencial disruptivo significativamente mayor para la sostenibilidad de la organización: la evaluación de la reformulación de los alimentos balanceados mediante la incorporación de subproductos agroindustriales disponibles localmente.

El potencial de reducción de la HC asociado a esta estrategia es elevado y se estima entre un 15 % y más del 50 %. Esta disminución se derivaría principalmente de dos factores: (a) la menor HC asignada a los subproductos en comparación con los granos vírgenes —especialmente cuando se aplican metodologías de asignación económica, como las promovidas por PEFCR Feed o GFLI— y (b) la reducción sustancial de las distancias de transporte al emplear recursos generados en la misma región de Entre Ríos.

No obstante, la implementación de esta estrategia conlleva importantes desafíos metodológicos y técnicos. Existe una escasez de datos de inventario de ciclo de vida específicos y representativos para subproductos regionales argentinos en bases de datos internacionales como GFLI o Ecoinvent. En consecuencia, sería necesario desarrollar inventarios locales o adaptar datos existentes, asegurando la transparencia respecto de la incertidumbre asociada.

La HC calculada para un subproducto es altamente sensible al método de asignación de impactos ambientales elegido; por ello, la adherencia a la jerarquía establecida por la norma ISO 14.044 y a las directrices de PEFCR Feed resulta fundamental para garantizar la credibilidad y comparabilidad de los resultados. Además, debe considerarse el riesgo de LUC vinculado con el cultivo original del cual deriva el subproducto.

Desde el punto de vista nutricional y operativo, la variabilidad en la composición de los subproductos exige un control de calidad riguroso y una reformulación precisa de las dietas (NRC, 2012). La posible presencia de factores antinutricionales o una menor digestibilidad podría limitar su inclusión o requerir pretratamientos específicos (Makkar, 2003). También debe evaluarse el impacto sobre los procesos de molienda, mezclado, peletizado y sobre la palatabilidad del alimento. Finalmente, asegurar el suministro constante, la calidad homogénea y el almacenamiento adecuado —considerando el riesgo de micotoxinas— constituye un desafío clave.

Las acciones específicas incluirían un mapeo exhaustivo de subproductos disponibles en Entre Ríos (p. ej., derivados de arroz, trigo, girasol, soja, cítricos), con el detalle de volúmenes, estacionalidad, costos y calidad nutricional. Posteriormente, se realizaría un análisis técnico-económico de reformulación,

seguido de pruebas de laboratorio y, en caso de resultados favorables, pruebas de desempeño animal. De manera paralela, se evaluaría el impacto en la HC y se desarrollarían alianzas con proveedores locales.

El objetivo es completar un estudio de viabilidad integral hacia junio de 2027, con indicadores clave de desempeño tales como la finalización del estudio y, potencialmente, el porcentaje de sustitución, la reducción de costos y la disminución de la HC. Su relación con la economía circular es ejemplar, ya que contribuye al cierre de bucles regionales, reduce la dependencia de recursos vírgenes y fomenta la simbiosis industrial (Korhonen et al., 2018).

Discusión

La discusión de los hallazgos se estructura en torno a la interpretación de los resultados en función de los objetivos del estudio, su comparación con la literatura científica y con *benchmarks* sectoriales, el análisis de las prácticas distintivas de la planta, la evaluación de la robustez y las limitaciones inherentes al estudio, y finalmente, una evaluación de la viabilidad e impacto potencial de las mejoras propuestas.

Los resultados ofrecen una visión matizada y multifacética del desempeño ambiental de la organización. En relación con el objetivo de estimar la contribución de las diferentes etapas a la HC, la discusión cualitativa y la evidencia de la literatura científica (Clune et al., 2017; Poore & Nemecek, 2018) sugieren una probable predominancia de la etapa de producción de MP en la HC total del alimento balanceado, especialmente al considerar el riesgo de emisiones asociadas al LUC en MP de origen externo. Este hallazgo subraya la urgencia de abordar la sostenibilidad de la cadena de suministro como un aspecto prioritario.

En relación con la contribución de las fuentes energéticas operativas, se confirmó que el consumo de energía eléctrica (alcance 2) representa el 35 % de la HC parcial calculada, mientras que el gas natural (alcance 1) aporta el 11,1 %. En conjunto, estos consumos se identifican como los principales focos de emisiones directamente gestionables por la planta, ya sea mediante mejoras de eficiencia o decisiones de compra de energía. Asimismo, el análisis de la magnitud de las emisiones de alcance 3 también encontró un fuerte respaldo en los datos; el componente de transporte de alcance 3 ya constituye el 53,9 % de la HC parcial estimada. Es previsible que la inclusión de las emisiones completas derivadas de la producción de materias primas consolidaría el predominio del alcance 3 en la HC total del ciclo de vida, en línea con lo reportado por el GHG Protocol (2011) para este sector.

En cuanto a los objetivos vinculados con la economía circular, los hallazgos que muestran la recirculación total del polvo de proceso y el potencial de las propuestas de valorización de subproductos locales (Geissdoerfer et al., 2017) respaldan la viabilidad técnica y el potencial de beneficios económicos y ambientales derivados de profundizar estas prácticas. Finalmente, respecto de la agricultura regenerativa, los resultados confirman parcialmente su rol como fuente viable de MP con menor impacto ambiental. Su implementación actual constituye una fortaleza, y el potencial de reducción adicional de la HC dependerá de su optimización continua y de la mejora de otras áreas operativas, pese a las barreras tecnológicas, financieras y de mercado identificadas (Gaffney et al., 2019).

La HC parcial calculada (82,21 kg CO₂e por tonelada) debe interpretarse como un punto de partida. Estudios de ACV más exhaustivos para alimentos balanceados en Europa reportan valores que oscilan entre 300 y más de 1500 kg CO₂e/t, según la composición de ingredientes y la metodología empleada (Lesschen et al., 2011; MacLeod et al., 2013). La HC de la soja brasileña, por ejemplo, puede variar sustancialmente según se incluya o no el LUC (Rainforest Foundation Norway, 2020), lo que ilustra la magnitud del impacto potencial aún no cuantificado para las MP externas utilizadas por la planta.

El consumo eléctrico de la planta (82,1 kWh/t) parece situarse en el rango superior —e incluso por encima— de los *benchmarks* reportados para plantas consideradas eficientes (30-60 kWh/t) (FeedTech,

2015; Kaizen Institute, s. f.), lo que evidencia una oportunidad concreta de mejora en este aspecto. El uso de gas natural, por su parte, resulta preferible frente a combustibles más pesados. La estrategia de incorporar subproductos se alinea coherentemente con las directrices de la FAO (2017) y con las políticas de economía circular promovidas por la Unión Europea (Comisión Europea, 2020), que fomentan su valorización (EFFPA, s. f.). Diversos estudios demuestran que la sustitución de granos por subproductos en las dietas animales puede conducir a una reducción significativa de la HC de los alimentos balanceados (Llonch et al., 2017).

La integración vertical parcial mediante agricultura regenerativa para el 50 % de las MP es una ventaja competitiva y de sostenibilidad relevante. Este modelo incrementa el control sobre la calidad y el perfil ambiental de los insumos, reduce riesgos asociados a precios y disponibilidad, y disminuye la HC de transporte correspondiente a esa fracción. Esta práctica no solo mitiga impactos, sino que busca activamente regenerar la salud del suelo, un enfoque proactivo valorado (FiBL & IFOAM, 2021).

De igual modo, la recirculación del 100 % del polvo de proceso es una clara manifestación de eficiencia en el uso de los recursos y prevención de la contaminación, alineada con los principios de la economía circular. Esta práctica evita la pérdida de material valorizable, reduce la necesidad de tratamiento de residuos y mejora la calidad del aire laboral, pudiendo además generar valor de marca.

La robustez del estudio se fundamenta en el uso de datos primarios, en la aplicación de una metodología mixta y en la definición explícita de un escenario de abastecimiento, lo que permite una evaluación contextualizada. Las propuestas de mejora se derivan de manera coherente de los hallazgos obtenidos. No obstante, el estudio presenta limitaciones relevantes. En primer lugar, la HC calculada es parcial, ya que excluye las emisiones completas derivadas de la producción agrícola y del LUC, identificados como aspectos críticos por Poore y Nemecek (2018). Además, se emplearon datos secundarios y factores de emisión genéricos, con escasa disponibilidad de LCI regionalizados. La generalización de los resultados también es restringida, dado que se trata de un estudio de caso único, aunque los hallazgos cualitativos y las estrategias propuestas podrían extrapolarse a contextos similares. Por último, el análisis económico es preliminar y de carácter cualitativo; no se monetizan externalidades ambientales y el estudio constituye una “fotografía” temporal que no captura la dinámica a largo plazo.

Las propuestas de mejora operativas son, en su mayoría, técnicamente factibles con tecnologías existentes y ofrecen un potencial incremental significativo. Su viabilidad económica varía desde medidas de bajo costo hasta inversiones mayores que requieren análisis de rentabilidad específico (UNIDO, 2010).

La propuesta de incorporación de subproductos agroindustriales locales representa la iniciativa con mayor potencial transformador. Su viabilidad ambiental es elevada (Salemdeeb et al., 2017); la viabilidad técnica puede considerarse moderada a alta, aunque con desafíos en estandarización, I+D y adaptación de procesos (Makkar et al., 2007); y la viabilidad económica podría ser favorable si los subproductos resultasen competitivos y los costos adicionales fueran manejables, lo que contribuiría además a mejorar la resiliencia ante la volatilidad de precios.

El impacto potencial incluye una reducción sustancial de la HC, el fortalecimiento de la economía circular regional, la disminución de la presión sobre el uso de la tierra y una mejora de la seguridad alimentaria. Su éxito dependerá de la colaboración a lo largo de la cadena de valor, del desarrollo de investigación aplicada y de la existencia de un mercado funcional para subproductos estandarizados.

Conclusiones

A partir del análisis realizado, se constata que la organización estudiada, aun operando con un 50 % de MP de origen externo, presenta fortalezas significativas en su gestión ambiental actual. Se destacan la implementación de agricultura regenerativa en la mitad de su abastecimiento de granos y la completa

recirculación interna del polvo de proceso, prácticas que constituyen una base sólida para la sostenibilidad de la planta.

La estimación de la HC parcial (alcances 1 y 2 y transporte A3) arrojó un valor aproximado de 82,21 kg de CO₂ equivalente por tonelada de producto. Dentro de esta medición limitada, el análisis identificó el transporte del producto terminado y el consumo de energía eléctrica como los principales puntos críticos. No obstante, se concluye que la mayor contribución potencial a la HC total del ciclo de vida —y, en consecuencia, la mayor incertidumbre— reside en las emisiones no cuantificadas asociadas a la producción del 50 % de las MP externas (especialmente por el riesgo de LUC) y a la producción agrícola en general.

Estos hallazgos son consistentes con los objetivos del estudio, que buscaban cuantificar la contribución de las fuentes energéticas operativas y analizar la magnitud de las emisiones de alcance 3. Asimismo, si bien la cuantificación exhaustiva de la contribución de las MP a la HC total excedió el alcance de este estudio parcial, la evidencia sugiere que esta etapa es probablemente la de mayor impacto, constituyendo un aspecto central explorado en la investigación.

El estudio también permite concluir, además, que la implementación de prácticas adicionales de economía circular y la optimización de la agricultura regenerativa son técnicamente viables. Estas estrategias ofrecen un potencial considerable no solo para reducir el impacto ambiental global de las operaciones, sino también para generar beneficios económicos, en línea con los objetivos de la investigación orientados a evaluar su viabilidad. La propuesta estratégica de incorporar subproductos agroindustriales locales emerge como la iniciativa con mayor potencial transformador para reducir la HC, optimizar costos y fomentar la economía circular regional, aunque su implementación requerirá superar importantes desafíos metodológicos, técnicos y logísticos.

Los principales desafíos para una transición más profunda hacia la sostenibilidad incluyen la necesidad de inversión en tecnologías, el acceso a datos ambientales fiables y localmente representativos —especialmente para las MP y subproductos—, la gestión de la variabilidad inherente a la cadena de suministro de subproductos y el fortalecimiento de una mayor colaboración y conciencia ambiental en toda la cadena de valor.

Finalmente, este estudio de caso subraya la importancia crítica de adoptar una perspectiva de ciclo de vida en la toma de decisiones dentro de la industria de alimentos balanceados, incluso en el caso de las PyMEs. Asimismo, pone de relieve que, si bien las mejoras implementadas a nivel interno de la planta son valiosas, la gestión sostenible de la cadena de suministro de MP —con especial atención a aquellas de origen agrícola— es fundamental para lograr reducciones significativas en la huella ambiental global del sector. Las prácticas distintivas que ya caracterizan a la organización estudiada, como la agricultura regenerativa parcial y la internalización completa de los residuos de polvo, resultan ejemplares y deberían no solo consolidarse, sino también expandirse en la medida de lo posible.

Referencias

- Clune, S., Crossin, E., & Verghese, K. (2017). Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. *Journal of Cleaner Production*, 140, 766–783.
- European Former Foodstuff Processors Association. (s. f.). *Circular and low carbon footprint feed*. Effpa. <https://effpa.eu/our-focuses/circular-and-low-carbon-footprint-feed/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Cities and circular economy for food*. Ellen MacArthur Foundation.
- European Commission. (2020). *Circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*. European Commission.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). *The future of food and agriculture: Trends and challenges*. FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *Transforming the food and agriculture sector in the 2030 agenda*. FAO.
- Fearnside, P. M. (2000). Greenhouse gas emissions from deforestation in the Brazilian Amazon. *Climatic Change*, 46(1–2), 115–128.
- FeedTech. (2015). *Reducing energy consumption in feed mills*. Reed Business Media.
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., Koehler, A., Pennington, D., Suh, S., & Wenzel, H. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21.
- Franetovich, M., Rébora, C., Picasso, D., Palma, R., & Gosparini, B. (Eds.). (2020). *Huella de carbono de la cadena de trigo argentina*. INTA Ediciones / ArgenTrigo.
- Gaffney, J., Challies, E., Polly, J. M., & Lucas, A. (2019). *Barriers and enablers to adoption of regenerative agriculture in the Goulburn Broken catchment: Report for the Goulburn Broken Catchment Management Authority*. University of Melbourne.
- Garnett, T. (2011). Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy*, 36, S23–S32.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The circular economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Gibbs, H. K., Ruesch, A. S., Achard, F., Clayton, M. K., Holmgren, P., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2010). Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(38), 16732–16737.
- Giller, K. E., Hijbeek, R., Andersson, J. A., & Sumberg, J. (2021). Regenerative agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture*, 50(1), 13–25.
- Greenhouse Gas Protocol. (2011). *Corporate value chain (scope 3) accounting and reporting standard*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.
- Greenhouse Gas Protocol. (s. f.). *GHG protocol corporate accounting and reporting standard (Rev. Ed.)*. World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development.

- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(9), 3232–3237.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. IPCC.
- International Organization for Standardization (ISO). (2006a). *ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2006b). *ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2014). *ISO 14046:2014 Environmental management – Water footprint – Principles, requirements and guidelines*. ISO.
- International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 14067:2018 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*. ISO.
- Jurgilevich, A., Birge, T., Kentala-Lehtonen, J., Korhonen-Kurki, K., Pietikäinen, J., Saikku, L., & Schösler, H. (2016). Transition towards circular economy in the food system. *Sustainability*, 8(1), 69.
- Kaizen Institute. (s. f.). *A3 eficiencia de energía en la industria de alimentos*. Kaizen. <https://kaizen.com/es/insights-es/caso-de-estudio-eficiencia-de-energia-en-la-industria-de-alimentos/>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: The concept and its limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46.
- Lesschen, J. P., van den Berg, M., Westhoek, H. J., Witzke, H. P., & Oenema, O. (2011). Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors. *Animal Feed Science and Technology*, 166, 16–28.
- Llonch, P., Tarlera, S., Freyre, B., & Gasa, J. (2017). Environmental impact of including food by-products in pig diets: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 151, 232–239.
- MacLeod, M., Gerber, P., Mottet, A., Tempio, G., Falcucci, A., Opio, C., Brogniez, D., & Steinfeld, H. (2013). *Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains: A global life cycle assessment*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Makkar, H. P. S. (2003). Effects and fate of tannins in ruminant animals, adaptation to tannins, and strategies to overcome detrimental effects of feeding tannin-rich feeds. *Small Ruminant Research*, 49(3), 241–256.
- Makkar, H. P. S., Blümmel, M., Borowy, N. K., & Becker, K. (2007). Gravimetric determination of tannins and their correlations with chemical and protein precipitation methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 71(2), 161–168.
- Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., & Gerber, P. (2017). Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, 14, 1–8.
- National Research Council (NRC). (2012). *Nutrient requirements of swine* (11.^a ed. rev.). National Academies Press.
- Pandey, D., Agrawal, M., & Pandey, J. S. (2011). Carbon footprint: Current methods of estimation. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 63(5), 928–937.

- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992.
- Rainforest Foundation Norway (RFN). (2020). *The carbon footprint of Brazilian soy*. RFN.
- Research Institute of Organic Agriculture (FiBL), & International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM). (2021). *The world of organic agriculture: Statistics and emerging trends 2021*. FiBL & IFOAM.
- Rhodes, C. J. (2017). Regenerative agriculture. *Science Progress*, 100(1), 88–96.
- Salemdeeb, R., zu Ermgassen, E. K., Kim, M. H., Balmford, A., & Al-Tabbaa, A. (2017). Environmental and health impacts of using food waste as animal feed: A comparative analysis of food waste management options. *Journal of cleaner production*, 140, 871–880.
- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2010). *Greening the SMEs: A practical guide to resource efficient cleaner production*. UNIDO.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6.^a ed.). Sage publications.