ARTÍCULO CIENTÍFICO

EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE FRIJOL DE RIEGO Y TEMPORAL EN GUANAJUATO: UNA ALTERNATIVA DE VALORIZACIÓN

José Ramón Castellanos-Castro[1], José Enrique Botello-Álvarez[1], Alfredo Josué Gámez-Vázquez[2], Roberto Carlos Salmorán-Salgado[1], María Teresa Maldonado-Mancera[1]*

Resumen

El frijol es un cultivo básico en la dieta mexicana y una fuente importante de ingresos para pequeños productores. En Guanajuato, su producción enfrenta retos crecientes por el cambio climático, altos costos y bajos rendimientos. Este estudio implementó la metodología de análisis de ciclo de vida para comparar los impactos ambientales de la producción de frijol bajo riego y temporal, así como un módulo de procesamiento. El sistema de riego mostró mayores rendimientos (1.91 vs 0.39 t/ha), pero también mayores impactos en cambio climático (2.15 vs 2.05 kg CO_2 eq) y agotamiento de agua (1.75 vs 0.0 m³). El cultivo de temporal presentó mayor ocupación de tierras agrícolas (17.87 vs 4.21 m²a). La etapa de deshidratación fue la más intensiva (hasta 81 % del impacto). Se identifican oportunidades de mitigación diferenciadas para cada sistema, orientadas a una producción y valorización sustentable.

Palabras clave:

Impacto ambiental, cambio climático, uso de suelo agrícola, análisis de ciclo de vida.

Abstract

Beans are a staple crop in the Mexican diet and an important source of income for small-scale farmers. In Guanajuato, bean production faces growing challenges due to climate change, high production costs, and low yields. This study applied the life cycle assessment (LCA) methodology to compare the environmental impacts of bean production under irrigated and rainfed systems, including a processing stage. The irrigated system showed higher yields (1.91 vs 0.39 t/ha), but also greater impacts in terms of climate change (2.15 vs 2.05 kg CO_2 eq) and water depletion (1.75 vs 0.0 m³). The rainfed system had greater agricultural land occupation (17.87 vs 4.21 m²a). The dehydration stage was the most intensive (up to 81% of total impact). Distinct mitigation opportunities were identified for each system, aiming toward more sustainable production and valorization.

Keywords:

Environmental impact, climate change, agricultural land use, life cycle assessment.

[1]Departamento de Ingeniería Bioquímica y ambiental, Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México, Av. Tecnológico y Av. García Cubas S/N, Celaya, Guanajuato, 38010, México.
[2]Departamento de Producción y Tecnología de Semillas de Cebada, Campo Experimental Bajío-INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel Allende Celaya km 6.5, Guanajuato. 38110, México.
*Autor de correspondencia: maritere22190@icloud.com

1. Introducción

México cuenta con una superficie total de 196,437,500 ha, de las cuales, en el año 2023, se destinaron 20,023,594 ha (equivalente al 10.19%) a actividades agrícolas. Los productos que generaron una mayor derrama económica fueron el maíz, con 172,353 millones de pesos; el aguacate, con 60,097 millones de pesos; y la caña de azúcar, con 52,936 millones de pesos. En cuanto a los principales cultivos sembrados, el maíz ocupó 6,941,031 ha, seguido del sorgo con 1,359,920 ha y el frijol con 1,091,125 ha (SIAP, 2023). El frijol es una de las legumbres más consumidas en México con un consumo per cápita anual de 11 kg; es parte esencial de la dieta tradicional desde tiempos prehispánicos, junto al maíz y el chile. Su alto valor nutricional, bajo costo, versatilidad culinaria y adaptabilidad a diversas regiones lo convierten en un alimento básico y accesible, además de ser un símbolo cultural profundamente arraigado.

Los principales estados productores de frijol fueron Zacatecas con 314,987 ha, Durango con 153,014 ha y Chiapas con 112,563 ha. Sin embargo, los estados que obtuvieron la mayor derrama económica por la producción de frijol fueron Sinaloa, con 3,822 millones de pesos; Zacatecas, con 3,052 millones de pesos; y Nayarit, con 1,450 millones de pesos debido a los altos rendimientos y la gran superficie sembrada. Este cultivo enfrenta un índice de siniestralidad elevado del 30.23% (SIAP, 2023), provocado principalmente por el cambio climático generando lluvias irregulares y temperaturas extremas. El cultivo de frijol en modalidad de temporal es el más afectado ocasionando que año tras año, la superficie sembrada disminuya drásticamente. Los estados más afectados por estas condiciones fueron Durango, San Luis Potosí y Querétaro.

Los costos de producción para una hectárea de frijol en modalidad de riego ascienden aproximadamente a 30,000 pesos. En el año 2023, según reportes del FIRA, el precio estimado por tonelada era de 17,500 pesos, lo que implica que el punto de equilibrio se alcanza con un rendimiento mínimo de 1.72 t/ha. Rendimientos inferiores resultan en pérdidas económicas. En cuanto a la rentabilidad del cultivo de frijol en modalidad de temporal, generalmente se registran pérdidas debido a los bajos rendimientos obtenidos. Por esta razón, los agricultores que optan por esta modalidad suelen cultivarlo principalmente para autoconsumo.

En el año 2023, Guanajuato ocupó el sexto lugar a nivel nacional en superficie sembrada de frijol y en derrama económica, con 58,664 ha y un valor de 696 millones de pesos, presentando un porcentaje de siniestralidad del 16.8%. En modalidad de temporal, se sembraron 50,311 ha (85.76%) con un rendimiento promedio de 0.56 t/ha, lo que generó una derrama económica de 368 millones de pesos (52.87%). En modalidad de riego, se cultivaron 8,353 ha (14.24%) con un rendimiento de 2.38 t/ha y un valor económico de 328 millones de pesos (47.13%). El cultivo de frijol en Guanajuato ha sufrido una significativa disminución en su superficie sembrada desde el año 2000, con una reducción de 4,015 ha (32.46%) en modalidad de riego y 57,914 ha (53.51%) en temporal (SIAP, 2023). Este descenso se atribuye a factores como el cambio climático, que afecta los rendimientos, los altos costos de producción, la competencia con cultivos más rentables como las hortalizas, la reducción de apoyos gubernamentales y cambios en la demanda del mercado. Además, el envejecimiento de los agricultores y la falta de relevo generacional han agravado esta situación, afectando la producción de frijol en el estado.

El frijol es una fuente importante de nutrientes, compuestos nutracéuticos y antioxidantes esenciales en la alimentación humana. Destaca por su alto contenido de carbohidratos, proteínas y fibra. Entre los minerales más abundantes en el frijol se encuentran potasio, hierro, magnesio y calcio. El contenido de proteína varía entre el 20 y el 30 % según la variedad de *Phaseolus* (Paredes et al., 2009). En cuanto a los carbohidratos, estos representan entre el 55 y el 65 %, conformados principalmente por polisacáridos derivados del almidón y fibra dietética, además de una menor proporción de mono- y oligosacáridos (Reynoso-Camacho et al., 2006). Se ha asociado el consumo regular de frijol con una disminución del riesgo de desarrollar enfermedades crónicas y cardiovasculares, como cáncer, diabetes y obesidad. Además, se ha observado que su ingesta contribuye a mejorar el índice glucémico y a reducir los niveles de colesterol y triglicéridos en sangre (Suárez-Martínez et al., 2016).

En este trabajo se presenta un análisis del impacto ambiental de la producción agrícola convencional de frijol de riego y de temporal en Guanajuato y finalmente se presenta la elaboración de harinas de frijol cocido como una alternativa para aumentar y facilitar su consumo.

2. Metodología

2.1. Análisis de impacto ambiental

En este estudio se consideró la producción de frijol bajo riego en los meses de febrero -mayo y temporal junio – septiembre en el Estado de Guanajuato. Los datos del paquete tecnológico de ambos cultivos que incluyen insumos y labores agrícolas fueron proporcionados por el

Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Unidad Bajío ubicada en Celaya, Guanajuato. El Análisis de Ciclo de Vida ACV se realizó bajo las normas ISO 14040 (ISO, 2006a) y 14044 (ISO, 2006b). El proceso comprendió 4 etapas: la definición de objetivos y alcance de ACV, los inventarios de insumos y emisiones, la evaluación de los impactos ambientales y la interpretación de los resultados. Se plantea como objetivo evaluar el impacto de la producción agrícola de frijol bajo riego y temporal. El análisis se considera "de la cuna a la puerta", es decir, desde la producción de los insumos hasta la cosecha del frijol (Figura 1). Como Unidad Funcional (FU) se consideró un kilogramo de frijol.

En el inventario de insumos se consideró la semilla, fertilizantes, herbicidas, plaguicidas, el consumo de diésel en las labores agrícolas y el uso de energía eléctrica en el caso de riego. Las cargas ambientales de los insumos (Backgroud) se evaluaron de la base datos Ecoinvent v3.9. Las emisiones hacia el aire, el agua y suelo durante el cultivo de frijol (Foreground) fueron evaluados por las siguientes metodologías. Para los compuestos nitrogenados provenientes de la fertilización se usó las metodologías de manual del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2019). Las emisiones asociadas al consumo de diésel en maquinaria agrícola fueron evaluadas por la metodología del Software: Gases de Efecto Invernadero, Regulación de Emisiones y Uso de Energía en Tecnologías (GREET, 2023). Las emisiones de pesticidas al agua, aire y suelo se estimaron utilizando el software SimaPro®. Las emisiones de fosfatos a los cuerpos de agua se calcularon con los supuestos de Parajulli et al (2017).

Para la determinación de los indicadores de impacto ambiental en los rubros de daño a la salud humana, daño a los ecosistemas y agotamiento de recursos, se utilizó el software SimaPro® v9.5, que emplea la metodología ReCiPe 2016 v1.1, con enfoques jerárquicos en indicadores de punto medio (Midpoint) y punto final (Huijbregts et al., 2017).

2.2. Harina de frijol cocido

Se utilizó frijol (*Phaseolus vulgaris*) variedad flor de junio, obtenido de un mercado local. Un kilogramo de frijol fue limpiado manualmente de impurezas y lavado a chorro de agua, (3 L/kg). Se adicionaron 13 g de NaCl. Los frijoles fueron cocidos en una olla de presión, agregando 4.5 L agua por kilogramo de frijol. Se cuantificó la cantidad de gas LP consumido en una estufa doméstica. Los frijoles cocidos fríos fueron molidos en una licuadora sin agua adicional. La pasta fue extendida sobre 5 bandejas de acero inoxidable de 70cmx50 cm recubiertas con papel encerado para evitar adherencia. Los frijoles fueron deshidratados en un secador de bandejas con control automático de temperatura con aire calentado con resistencias eléctricas e impulsado con ventiladores axiales. La temperatura en la cámara de secado fue de 75°C, el tiempo total de operación del secador fue de 10h. Los frijoles secos fueron molidos en un procesador de alimentos. Se realizaron pruebas de hidratación. Se realizó un análisis de impacto ambiental al proceso.

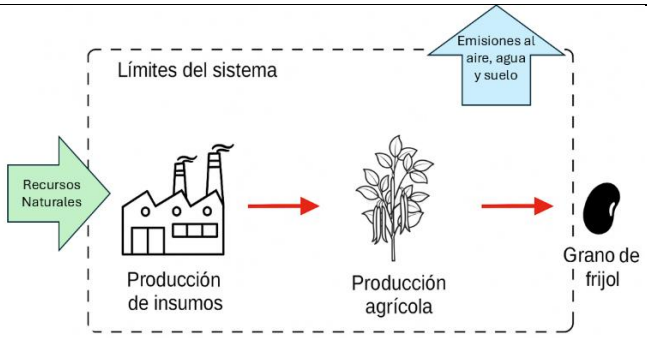

Figura 1. Definición de fronteras y sistema para el Análisis de Ciclo de Vida del frijol.

3. Resultados

3.1. Insumos y producción de frijol en riego y temporal

En la Figura 2 se presenta producción y la superficie sembrada de frijol en el Estado de Guanajuato 2000-2023. La producción de frijol de temporal desde el año 2000 representa cerca del 60% del total del Estado. En diferentes años, se ha presentado una severa disminución en la producción de frijol de temporal, asociado a siniestralidad por bajas precipitaciones. Se puede observar que existe una disminución gradual y constante de la superficie sembrada de frijol de temporal,

aproximadamente 2,800 ha/año. En el caso de frijol de riego se observa que la superficie y la producción se han mantenido con poca variación. En este periodo la productividad promedio es de 0.39 y 1.91 t/ha para temporal y riego respectivamente.

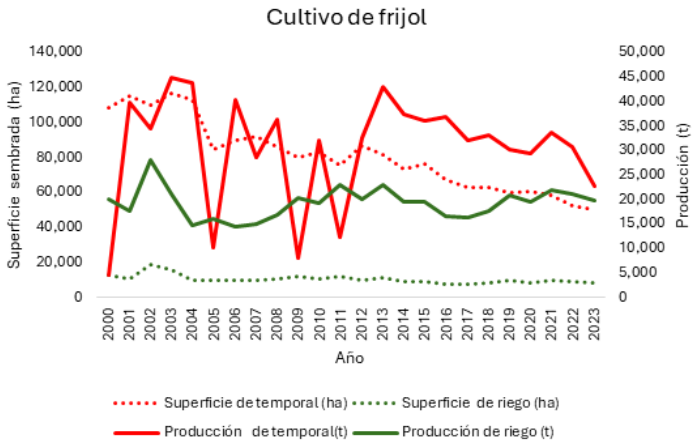

Figura 2. Producción y superficie sembrada de frijol en Estado de Guanajuato (SIAP, 2023).

En la Tabla 1 se presentan los insumos agrícolas y los rendimientos de la producción de frijol en las modalidades de riego y temporal proporcionados por el Instituto Nacional de Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria Unidad Bajío (INIFAP-Bajío). En el caso de fertilizantes se consideraron urea, difosfato de amonio y cloruro de potasio, como fuentes de nitrógeno, fósforo y potasio respectivamente. En riego se consideró el uso de agua de pozo extraída y distribuida por bombas con motor eléctrico. La diferencia más relevante entre las modalidades de cultivo es la densidad de siembra, que en el caso de riego demanda altas cantidades de agua y fertilizantes. En general, en Guanajuato la agricultura de riego para la producción de granos básicos es intensiva buscando su rentabilidad a través de altos rendimientos y bajo riesgo de siniestralidad. En el cultivo de temporal se busca reducir la inversión en insumos por el alto riesgo de siniestralidad.

Tabla 1. Insumos y rendimiento de frijol en las modalidades de riego y temporal.

Modalidad de cultivo	Riego	Temporal
Rendimiento (t/ha)	2.380	0.56
Labranza mecanizada (L Diésel/ha)	109	99
Semilla (Unidades/ha)	110,000	55,000
Fertilizante (kg/ha)	303	183.36
Nitrógeno (kg N/ha)	80	60
Fosforo (kg P_2O_5/ha)	60	40
Potasio (kg K_2O/ha)	30	0
Herbicidas (kg IA/ha)	2.483	2.48
Pesticidas (kg IA/ha)	0.190	0.19
Agua (m^3/ha)	4,500	0
Energía eléctrica (kWh/ha)	5,864	0

ha: ha, IA: ingrediente activo.

3.2. Impactos ambientales

Los resultados de las emisiones estimadas hacia el agua, suelo y aire en los módulos agrícolas por unidad funcional para las modalidades de riego y temporal se muestran en la Tabla 2. La evaluación de las emisiones con la metodología ReCiPe en conjunto con las aportaciones Backround para la fabricación de los insumos, revelaron diferencias significativas entre ambas modalidades de cultivo en las 18 categorías de impacto Midpoint.

Al comparar los impactos totales del sistema de producción de frijol bajo riego y temporal (Tabla 3), se observa que el frijol de riego presenta mayores impactos en la mayoría de las categorías evaluadas, destacando en cambio climático (2.15 vs. 2.05 kg CO_2 eq), radiación ionizante ($7.133x10^{-2}$ vs. $8.69x10^{-3}$ kBq U235 eq) y agotamiento de agua (1.75 m³ en riego, nulo en temporal), lo que refleja la presión hídrica asociada al uso de sistemas de riego. También se registraron valores más altos para el riego en acidificación terrestre, eutrofización (dulce y marina), formación de oxidantes fotoquímicos y material particulado, aunque en menor magnitud relativa. Por el contrario, el frijol de temporal presentó mayores cargas ambientales en las categorías relacionadas con toxicidad y ecotoxicidad: toxicidad humana (0.215 vs. 0.0905 kg 1,4-DB eq), ecotoxicidad terrestre (0.129 vs. 0.0313) y dulce (0.0377 vs. 0.0093), asociadas a prácticas menos controladas por el mayor uso de agroquímicos por hectárea efectiva. Asimismo, al bajo rendimiento del grano que conlleva a mayores relaciones de insumos contra producto, como se observa en la ocupación de suelo agrícola: 17.9 y 4.2 m²a/kg para riego y temporal respectivamente.

Tabla 2. Emisiones del módulo agrícola para la producción de 1 kg de frijol (FU) en modalidad de temporal y riego

Emisión	**Riego**	**Temporal**
Emisiones al aire		
Fertilización y actividades agrícolas:		
N_2O Directo (kg N_2O)	$7.241x10^{-4}$	$2.026x10^{-3}$
N_2O indirecto por volatilización (kg N_2O)	$5.282x10^{-5}$	$1.684x10^{-4}$
N_2O indirecto por lixiviación (kg N_2O)	$1.629x10^{-4}$	$4.557x10^{-4}$
CO_2 por urea [kg CO_2)	0.038	0.126
Amoníaco (kg NH_3)	$1.681x10^{-3}$	$5.357x10^{-3}$
Óxido nítrico (kg NO)	$1.345x10^{-3}$	$4.286x10^{-3}$
Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (kg NMVOC)	$3.613x10^{-4}$	$1.536x10^{-3}$
Material particulado PM_{10} (kg PM_{10})	$6.555x10^{-4}$	$2.786x10^{-3}$
Material particulado $PM_{2.5}$ (kg $PM_{2.5}$)	$2.521x10^{-5}$	$1.071x10^{-4}$
Plaguicidas (kg ingrediente activo)	$9.570x10^{-5}$	$4.294x10^{-4}$
Uso de combustibles en labranza, aplicación de plaguicidas/agroquímicos:		
Óxido nitroso (kg N_2O)	$1.442x10^{-6}$	$5.519x10^{-6}$
Metano (kg CH_4)	$9.877x10^{-7}$	$3.780x10^{-6}$
Dióxido de carbono (kg CO_2)	0.122	0.467
Monóxido de carbono (kg CO)	$3.137x10^{-4}$	$1.201x10^{-3}$
Óxidos de nitrógeno (kg NO_X)	$6.809x10^{-4}$	$2.606x10^{-3}$
Material particulado PM_{10} (kg PM_{10})	$4.676x10^{-5}$	$1.790x10^{-4}$
Material particulado $PM_{2.5}$ (kg $PM_{2.5}$)	$4.536x10^{-5}$	$1.736x10^{-4}$
Óxidos de azufre (kg SO_x)	$8.504x10^{-7}$	$3.254x10^{-6}$
Compuestos orgánicos volátiles (kg VOC's)	$6.506x10^{-5}$	$2.490x10^{-4}$
Emisiones al agua		
Plaguicidas (kg ingrediente activo)	$9.594x10^{-6}$	$4.766x10^{-5}$
Fosfatos (kg PO_4^{3-})	$1.261x10^{-3}$	$3.571x10^{-3}$
Potasio (kg KO_2)	$4.197x10^{-4}$	-
Emisiones al suelo		
Plaguicidas (kg ingrediente activo)	$1.009x10^{-3}$	$4.294x10^{-3}$

En particular, el agotamiento de recursos fósiles fue considerablemente mayor en el sistema de riego (0.597 vs. 0.379 kg oil eq), lo cual puede atribuirse a la participación dominante de la electricidad en la operación del riego presurizado, además del uso de insumos intensivos en energía como fertilizantes nitrogenados y potásicos. Mientras que en el sistema temporal el consumo de energía fósil se encuentra más relacionado con el uso de maquinaria agrícola y la producción de insumos, en el sistema de riego el requerimiento energético es más constante y directo, debido al bombeo de agua a lo largo del ciclo del cultivo. Esta diferencia refuerza la necesidad de considerar no solo los beneficios de rendimiento asociados al riego, sino también su dependencia de recursos no renovables y la

posibilidad de mitigarlos mediante tecnologías energéticas más limpias o eficientes.

Al comparar la huella de carbono obtenida en este estudio con la reportada por otros autores, se observan diferencias importantes. Por ejemplo, Pérez et al. (2024) estimaron una emisión de 1.20 kg de CO_2 equivalente por kilogramo de frijol seco procesado en cultivos orgánicos de riego en campo abierto en España. En contraste, Tidåker et al. (2021) reportaron valores más bajos tanto para el frijol como para otras legumbres cultivadas en Suecia: 0.44 kg de CO_2 eq./kg de frijol.

Al analizar las contribuciones porcentuales de las distintas fuentes dentro de cada sistema, se observa que en el temporal (Figura 3) la mayor parte del impacto en cambio climático (67.7%), acidificación terrestre (77.8%) y eutrofización (más del 80%) proviene de las emisiones directas del cultivo, especialmente las derivadas del uso de fertilizantes nitrogenados y aplicación de pesticidas, siendo estos últimos los principales responsables del agotamiento de la capa de ozono y la ecotoxicidad. Además, el uso de maquinaria agrícola a base de diésel contribuye significativamente al agotamiento de recursos fósiles y formación de oxidantes fotoquímicos. En contraste, en el sistema de riego (Figura 4), la electricidad para bombeo representa la fuente predominante de impactos en cambio climático (69.7%), formación de oxidantes fotoquímicos (69.2%), radiación ionizante (95.9%) y agotamiento de recursos fósiles (81.6%), destacando la importancia de la matriz energética utilizada.

Tabla 3. Valores absolutos para los indicadores de impacto Midpoint en los módulos agrícolas de riego y temporal por unidad funcional.

Categoría de impacto	**Unidad**	**Riego**	**Temporal**
Cambia climático	kg CO_2 eq	2.149	2.046
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC-11 eq	$4.894x10^{-8}$	$1.05x10^{-7}$
Acidificación terrestre	kg SO_2 eq	$1.083x10^{-2}$	$1.873x10^{-2}$
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	$4.666x10^{-4}$	$1.212x10^{-3}$
Eutrofización marina	kg N eq	$4.330x10^{-4}$	$1.032x10^{-3}$
Toxicidad humana	kg 1,4-DB eq	$9.053x10^{-2}$	0.2149
Formación de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC	$6.352x10^{-3}$	$7.14x10^{-3}$
Formación de material particulado	kg PM_{10} eq	$4.414x10^{-3}$	$7.04x10^{-3}$
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DB eq	$3.130x10^{-2}$	0.12913
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DB eq	$9.340x10^{-3}$	$3.768x10^{-2}$
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DB eq	$2.559x10^{-3}$	$8.46x10^{-3}$
Radiación ionizante	kBq U_{235} eq	$7.133x10^{-2}$	$8.69x10^{-3}$
Ocupación de tierras agrícolas	m^2a	4.21	17.87
Ocupación de tierras urbanas	m^2a	$2.323x10^{-2}$	$6.38x10^{-2}$
Transformación natural de suelo	m^2	$5.882x10^{-6}$	$1.93x10^{-5}$
Agotamiento de agua	m^3	1.746	0
Agotamiento de metales	kg Fe eq	$1.958x10^{-2}$	$5.66x10^{-2}$
Agotamiento de recursos fósiles	kg oil eq	0.597	0.379

Las emisiones directas del cultivo también son relevantes en categorías como eutrofización y acidificación, mientras que la producción y aplicación de fertilizantes y pesticidas mantienen su rol crítico en toxicidad, ecotoxicidad y agotamiento de metales. En conjunto, estos resultados subrayan la necesidad de equilibrar los beneficios productivos del riego con su elevada dependencia energética y la potencial mitigación mediante fuentes renovables, así como la importancia de optimizar el uso de agroquímicos en sistemas de temporal para reducir sus impactos toxicológicos y de uso del suelo.

Además del análisis del módulo agrícola, se incorporaron dos etapas adicionales en la evaluación ambiental: el cocimiento doméstico del frijol (realizado en olla de presión con gas LP) y la deshidratación para la obtención de harina (mediante horno eléctrico), cuyos inventarios se presentan en la Tabla 4. Los resultados, expresados como puntuación única (Figura 5), evidencian que la etapa de deshidratación es la principal contribuyente al impacto ambiental total en ambos escenarios de cultivo, debido a su elevado consumo energético. En el caso del frijol de riego, la deshidratación representa el 76 % del impacto total, mientras que en el escenario de temporal

alcanza el 81 %. El módulo agrícola aporta el 17 % y 12 % en los sistemas de riego y temporal, respectivamente. Por su parte, el cocimiento tiene una menor contribución relativa, con un 7 % para ambos escenarios. Estos resultados señalan a la deshidratación como la etapa crítica a optimizar dentro del sistema de producción evaluado.

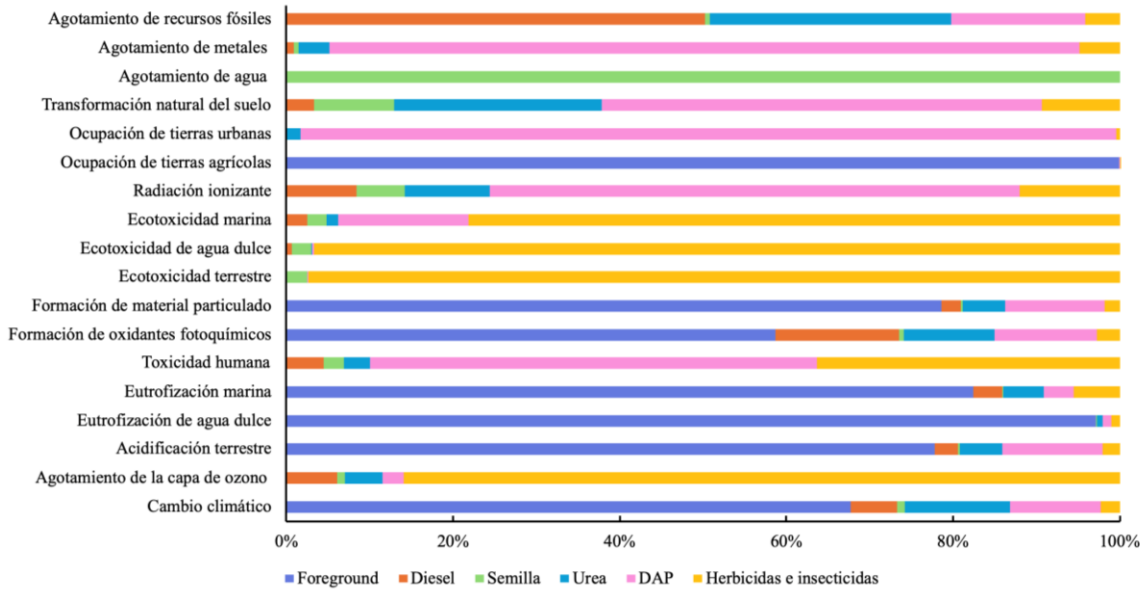

Figura 3. Indicadores de punto de medio de impacto ambiental y porcentajes de contribución de los insumos en la producción de frijol de temporal.

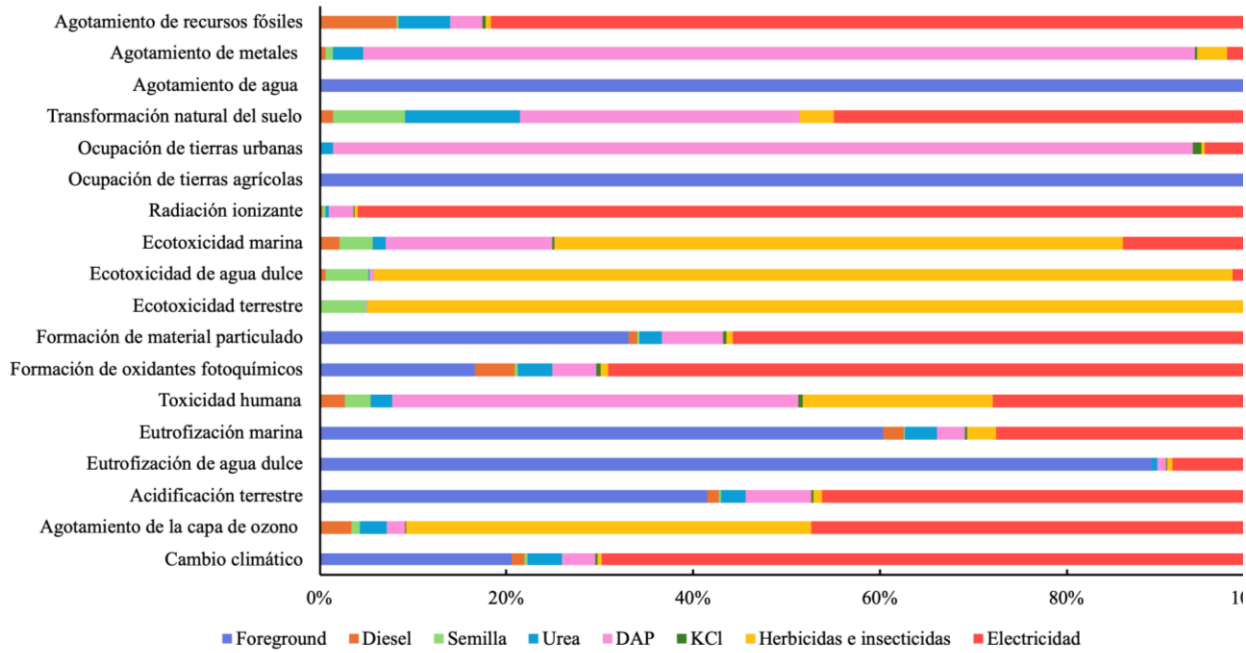

Figura 4. Indicadores de impacto ambiental de punto de medio y porcentajes de contribución de los insumos en la producción de frijol de riego.

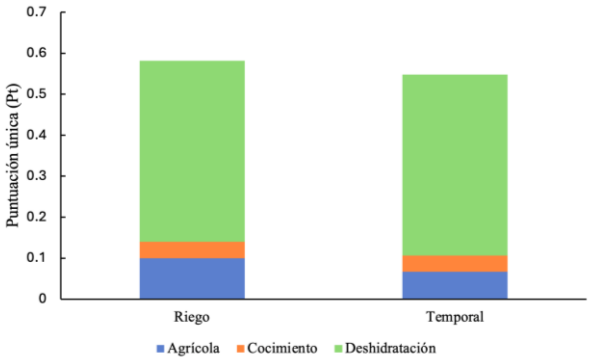

Figura 5. Puntuación única de impacto ambiental de los módulos agrícola, cocimiento y deshidratación de las harinas de frijol.

3.3. Valorización harina de frijol

Por cada kilogramo de frijol sometido a cocimiento y deshidratación se obtienen 4.1 kg de producto cocido y 0.95 kg de harina. En la Tabla 4 se presenta los insumos y gastos energéticos para la producción de frijol cocido y deshidratado. El gasto energético más relevante es la energía eléctrica consumida durante el secado. Tanto el proceso de cocido como el deshidratado contribuyen significativamente al impacto ambiental del frijol Figura 5.

La harina de frijol es también una alternativa de conservación y fácil preparación en los hogares. El valor monetario de la harina de frijol puede incrementarse hasta en un 300% del precio de frijol comercial. En ensayos de rehidratación, a cada 100 g de harina de frijol con 300 mL de agua hirviendo mezclando durante 3 minutos se obtuvieron pastas homogéneas. La pasta de frijol rehidratado tiene una viscosidad aparente de 6550 cP similar a la pasta de frijol cocido.

Tabla 4. Inventaros de Insumo Harina de Frijol

Insumo	**Cantidad**
Frijol (kg)	1.0
Agua de lavado (L)	3.0
Agua de cocimiento (L)	4.5
Sal (NaCl) (g)	13.0
Gas LP (kg)	0.18±0.025
Energía eléctrica (kWh)	12.68±0.390
Rendimientos	
Frijol cocido (kg)	4.087±0.150
Harina de frijol (kg)	0.950±0.056

4. Conclusiones

El análisis de ciclo de vida comparativo entre las modalidades de cultivo de frijol bajo riego y temporal en Guanajuato evidenció diferencias significativas tanto en productividad como en impactos ambientales. El sistema de riego presentó rendimientos considerablemente mayores (1.91 t/ha frente a 0.39 t/ha), pero también implicó un uso intensivo de agua, fertilizantes y energía eléctrica, lo que resultó en mayores impactos en categorías como cambio climático o huella de carbono (2.15 vs 2.05 kg CO_2 eq), agotamiento de agua (1.75 vs 0.0 m³) y uso de recursos fósiles, con una huella ambiental más elevada por unidad de producto. En contraste, el cultivo de temporal, aunque con menores insumos, mostró mayores impactos en categorías relacionadas con toxicidad y ecotoxicidad, debido al bajo rendimiento y a un manejo menos controlado de agroquímicos.

Un aspecto crítico identificado fue la ocupación de tierras agrícolas, cuyo impacto fue significativamente mayor en el cultivo de temporal (17.87 vs 4.21 m²a). Este resultado está directamente relacionado con la baja productividad del sistema de temporal, ya que se requiere una mayor superficie para obtener la misma cantidad de frijol en comparación con el sistema de riego. Esta presión sobre el uso del suelo no solo representa un desafío ambiental, sino también limita el potencial de intensificación sostenible en regiones donde la tierra cultivable es un recurso escaso o en competencia con otros usos. Por ello, mejorar los rendimientos del cultivo de temporal, a través de mejores prácticas agronómicas o tecnologías adaptadas, podría ser clave para reducir su impacto por

unidad de producto, particularmente en lo referente a la ocupación de tierras agrícolas.

Al ampliar el análisis hacia las etapas de procesamiento, se identificó que la deshidratación del frijol mediante horno eléctrico representa la fase más crítica en términos ambientales, con contribuciones de hasta el 81 % del impacto total del sistema, superando con amplio margen a los módulos agrícola y de cocimiento. Esta etapa, determinada principalmente por el consumo energético, requiere atención prioritaria para la optimización del proceso si se desea avanzar hacia sistemas de transformación más sostenibles. Por su parte, el cocimiento doméstico, realizado con gas LP, mostró una contribución moderada al impacto global, inferior al 8 % en ambos escenarios.

Finalmente, se destaca que la producción de harina de frijol, aunque ambientalmente intensiva por el proceso de secado, constituye una estrategia de valor agregado con beneficios en conservación y preparación rápida. Esto, junto con su buena reconstitución en ensayos de rehidratación, refuerza su potencial como alternativa alimentaria viable. En conjunto, los resultados subrayan la necesidad de implementar medidas diferenciadas para cada sistema: eficiencia energética y uso de energías limpias en el riego, y optimización del uso de insumos en el temporal, así como mejoras tecnológicas en la etapa de deshidratación para reducir el impacto ambiental del producto final.

Referencias

FIRA (Fideicomisos Institucionales de Relación con la Agricultura). (2023). Fideicomisos institucionales en relación con la agricultura. https://www.fira.gob.mx/Nd/index.jsp

GREET (The Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation). (2023). Model (v. 13239). Argonne National Laboratory. https://greet.es.anl.gov/

Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., et. al. (2017). ReCiPe 2016 v1.1: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level – Report I: Characterization. Netherlands: RIVM. https://www.rivm.nl/en.

INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2017). Agenda técnica agrícola de Guanajuato. Gobierno de México.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2019). Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/.

ISO (International Organization for Standardization). (2006a). ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. https://www.iso.org/standard/37456.html.

ISO (International Organization for Standardization). (2006b). ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines. https://www.iso.org/standard/38498.html.

Paredes, M., Becerra, V., & Tay, J. (2009). Inorganic nutritional composition of common bean (Phaseolus vulgaris L.) genotypes race Chile. Chilean Journal of Agricultural Research, 69, 486–495. DOI:10.4067/S0718-58392009000400002.

Parajuli, R., Kristensen, I.S., Knudsen, M.T., Mogensen, L., Corona, A., et. al. (2017). Environmental life cycle assessments of producing maize, grass-clover, ryegrass and winter wheat straw for biorefinery. Journal of Cleaner Production, 142, 3859–3871. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.10.076.

Pérez, R., Fernández, C., Laca, A. & Laca, A. (2024). Evaluation of environmental impacts in legume crops: a case study of pgi white bean production in Southern Europe. Sustainability, 16, 8024. DOI:10.3390/su16188024.

Reynoso-Camacho, R., Ramos-Gomez, M., & Loarca-Pina, G. (2006). Bioactive components in common beans (Phaseolus vulgaris L.). In Advances in Agricultural and Food Biotechnology (pp. 217–236). Research Signpost.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023). Cierre agrícola. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/.

Suárez-Martínez, S.E., Ferriz-Matínez, R.A., Campos-Vega, R., Elton-Puente, J.E., de la Torre-Carbot, K., & García-Gasca, T. (2016). Bean seeds: leading nutraceutical source for human health. CyTA. Journal of Food, 14(1), 131–137. DOI:10.1080/19476337.2015.1063548.

Tidåker, P., Karlsson Potter, H., Carlsson, G., & Röös, E. (2021). Towards sustainable consumption of legumes: How origin, processing and transport affect the environmental impact of pulses. Sustainable Production and Consumption, 27, 496–508. DOI:10.1016/j.spc.2021.01.017.