Circular Utilization of Brewer's Grains for Food, Energy, and Biomaterials: A Systematic Review of Strategies and Environmental Benefits

Estefany Rossemery Bernaola-Rodriguez[1]; Nayeli Melani Aylas-Huatuco[2]; Luis Enrique Cuevas Tenorio[3]
[1,2,3]Universidad Tecnológica del Perú, Perú,
U21314086@utp.edu.pe, U20221665@utp.edu.pe, *C28109@utp.edu.pe*

Abstract*—Brewer's spent grain (BSG) is the main solid waste product of the beer brewing process. Its high moisture content, rapid degradation, and storage and transportation costs make it difficult to manage. This study analyzes ways to utilize it to produce food and food ingredients, energy, fuels, and biomaterials within the framework of the circular economy. To this end, a systematic review was conducted using the PIOC strategy and the PRISMA guidelines. The Scopus search included articles published between 2020 and 2025. After applying the selection criteria, 21 articles remained. The studies describe pathways such as the extraction and hydrolysis of compounds, fermentation, anaerobic digestion, combustion, gasification, pyrolysis, composting, and the manufacture of biomaterials. These options make it possible to recover nutrients and useful compounds, produce renewable energy, replace conventional raw materials, and prevent some of the waste from ending up in landfills. However, putting these methods into practice requires addressing energy consumption during drying, variations in bagasse composition, transportation distances, lack of infrastructure, industrial scaling, and quality standards. The results show that this utilization can close material and energy cycles in the brewing industry, but each alternative must be validated through life-cycle assessments, techno-economic studies, and industrial trials.

Keywords: brewer's bagasse, circular economy, waste recovery, bioenergy, biomaterials.

Valorización circular del bagazo cervecero para alimentos, energía y biomateriales: revisión sistemática de estrategias y beneficios ambientales

Estefany Rossemery Bernaola-Rodriguez[1]; Nayeli Melani Aylas-Huatuco[2]; Luis Enrique Cuevas Tenorio[3]
[1,2,3]Universidad Tecnológica del Perú, Perú,
U21314086@utp.edu.pe, U20221665@utp.edu.pe, *C28109@utp.edu.pe*

Resumen*—El bagazo cervecero es el principal residuo sólido de la elaboración de cerveza. Su alta humedad, su rápida degradación y los costos de almacenamiento y transporte hacen difícil su manejo. Este trabajo analiza las formas de aprovecharlo para producir alimentos e ingredientes, energía, combustibles y biomateriales desde la economía circular. Para ello, se realizó una revisión sistemática con la estrategia PIOC y las directrices PRISMA. La búsqueda en Scopus abarcó artículos publicados entre 2020 y 2025. Tras aplicar los criterios de selección, quedaron 21 artículos. Los estudios describen rutas como la extracción y la hidrólisis de compuestos, la fermentación, la digestión anaerobia, la combustión, la gasificación, la pirólisis, el compostaje y la fabricación de biomateriales. Estas opciones permiten recuperar nutrientes y compuestos útiles, producir energía renovable, reemplazar materias primas convencionales y evitar que una parte del residuo llegue a los vertederos. Aun así, llevarlas a la práctica exige resolver el consumo energético del secado, la variación en la composición del bagazo, las distancias de transporte, la falta de infraestructura, el escalamiento industrial y las normas de calidad. Los resultados muestran que este aprovechamiento puede cerrar ciclos de materiales y energía en la industria cervecera, pero cada alternativa debe comprobarse mediante análisis de ciclo de vida, estudios tecnoeconómicos y pruebas industriales.

***Palabras clave*— bagazo cervecero, economía circular, valorización de residuos, bioenergía, biomateriales**.

I. Introducción

La elaboración de cerveza genera varios subproductos. El más abundante es el bagazo cervecero, que representa cerca del 85 % de los residuos sólidos del proceso [1]. Se obtiene después de macerar y filtrar el grano malteado. Contiene celulosa, hemicelulosa, lignina, proteínas, minerales y otros compuestos que todavía pueden aprovecharse. Por eso, más que un desecho, puede tratarse como una materia prima secundaria para producir alimentos e ingredientes, energía, combustibles, biomateriales y otros productos de origen biológico [1]–[3].

El problema es que el bagazo sale del proceso con mucha humedad y se degrada con rapidez. Esto complica su conservación, almacenamiento, transporte y uso posterior. Si se acumula sin un manejo adecuado, puede generar olores, lixiviados, emisiones por descomposición y gastos adicionales para las cervecerías. Una parte suele destinarse a la alimentación animal, pero esta salida aporta poco valor y solo resulta práctica cuando las granjas están cerca de las plantas cerveceras [1], [2].

Los estudios proponen distintas formas de transformar el bagazo: gasificación, fermentación, digestión anaerobia, combustión, producción de biochar, extracción de compuestos y fabricación de biosorbentes o materiales de construcción [3]–[13]. La información, sin embargo, está repartida entre trabajos que usan procesos, condiciones y escalas muy diferentes. Varias alternativas también enfrentan un alto consumo de energía, costos de puesta en marcha, cambios en la composición del residuo y poca validación industrial.

Reunir y comparar estos resultados permite saber qué rutas existen, qué productos se obtienen, qué beneficios ambientales se han medido y qué obstáculos frenan su aplicación. Esta información puede ayudar a aprovechar mejor el bagazo, reducir los efectos de una disposición inadecuada y orientar a investigadores y empresas que buscan aplicar la economía circular en la industria cervecera.

Esta revisión sistemática analiza las estrategias empleadas para convertir el bagazo cervecero en alimentos e ingredientes, energía, combustibles y biomateriales. También examina los problemas de su manejo, los beneficios ambientales que reportan los estudios y las limitaciones que deben resolverse para aplicar estas rutas dentro de un modelo de economía circular.

II. Metodología

Se realizó una búsqueda sistemática de estudios sobre la valorización del bagazo cervecero. La pregunta principal y las preguntas específicas se organizaron con la estrategia PIOC: población o problema (P), intervención (I), resultados u outcomes (O) y contexto (C) [14].

En este trabajo, el problema comprende el bagazo cervecero y los efectos de su generación, almacenamiento y manejo. La intervención reúne las estrategias usadas para aprovecharlo. Los resultados abarcan los productos obtenidos y los beneficios ambientales, mientras que el contexto considera las etapas del proceso y las barreras que afectan su aplicación desde la economía circular.

Con estos componentes se planteó la pregunta principal: "¿Qué estrategias se utilizan para valorizar el bagazo cervecero en alimentos e ingredientes, energía, combustibles y biomateriales, y qué beneficios ambientales y limitaciones presentan desde un enfoque de economía circular?". El Cuadro

1 muestra las preguntas específicas que se derivaron de cada componente de PIOC.

Cuadro 1
Preguntas específicas por componente

Componente	Pregunta específica
RQ1: Población o problema	¿Qué impactos ambientales se asocian con la generación, almacenamiento y manejo inadecuado del bagazo cervecero?
RQ2: Intervención	¿Qué estrategias se utilizan para valorizar el bagazo cervecero en alimentos e ingredientes, energía, combustibles y biomateriales?
RQ3: Resultados	¿Qué beneficios ambientales se reportan mediante la aplicación de estas estrategias de valorización?
RQ4: Contexto	¿Qué etapas y limitaciones condicionan la implementación de estas estrategias desde un enfoque de economía circular?

Las preguntas específicas guiaron la búsqueda y la recopilación de datos. Para cada componente de PIOC se eligieron términos sobre bagazo cervecero, rutas de valorización, resultados ambientales y economía circular. Luego se unieron con operadores booleanos para formar la ecuación de búsqueda. El Cuadro 2 presenta las palabras clave y los conectores utilizados.

Cuadro 2
Aplicación de la estrategia PIOC

P	Problema	Bagazo cervecero	"Brewers spent grain" OR "sustainable brewing" OR "Brewing industry"
I	Intervención	Estrategias de valorización de subproductos	"By-products valorization" OR "brewing process" OR "Circular Economy" OR "Brewing" OR "New bio-based products"
O	Resultados	Reducción de impacto ambiental	"Sustainable brewing" OR "waste reduction" OR "Energy" OR "Brewers spent grain"
C	Contexto	Economía Circular	"Circular economy" OR "Waste reduction" OR "Environmental sustainability" OR "Eco-friendly"

La búsqueda se realizó en Scopus con la siguiente ecuación, construida a partir de las palabras clave seleccionadas:

(“Brewers spent grain" OR "sustainable brewing" OR "Brewing industry”) AND (“By-products valorization" OR "brewing process" OR "Brewing" OR "New bio-based products”) AND (“Sustainable brewing" OR "waste reduction" OR "Energy" OR "Brewers spent grain”) AND (“circular economy" OR "Waste reduction" OR "Environmental sustainability" OR "Eco-friendly”)

El proceso de identificación, cribado y selección se registró siguiendo la declaración PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [15]. La búsqueda inicial en Scopus arrojó 147 registros. Se retiraron tres porque no contenían información bibliográfica suficiente para la revisión preliminar; así, quedaron 144.

Después se aplicó el filtro de fecha. Solo se conservaron estudios publicados entre 2020 y 2025. Se excluyeron 11 registros fuera de ese periodo y quedaron 133.

El siguiente filtro correspondió al tipo de documento. Se mantuvieron únicamente los artículos científicos y se retiraron tesis, revisiones, capítulos de libro, ponencias y otros documentos. Esta etapa eliminó 36 registros y dejó 97 artículos.

Luego se revisó el acceso al texto completo. De los 97 artículos, 40 no estaban disponibles en acceso abierto y se excluyeron. Los 57 restantes pasaron a la evaluación temática y de elegibilidad. En esta fase se comprobó si cada trabajo cumplía los criterios definidos y si podía aportar datos para responder las preguntas de la revisión.

El Cuadro 3 reúne los criterios de inclusión (CI) y exclusión (CE) usados durante la selección.

Cuadro 3
Criterios de inclusión y exclusión

CRITERIO	ESPECIFICACIONES
CI – 1	Estudios publicados entre 2020 y 2025.
CI – 2	Publicaciones clasificadas como artículos científicos.
CI – 3	El bagazo cervecero es el tema principal o presenta resultados independientes para este residuo.
CI - 4	El estudio analiza al menos una ruta de valorización del bagazo cervecero.
CI - 5	El trabajo aporta datos suficientes para responder al menos una pregunta de la revisión.
CE - 1	Estudios publicados fuera del periodo 2020–2025.
CE - 2	Documentos que no fueron clasificados como artículos científicos.
CE - 3	Trabajos que no estudian de manera específica el bagazo cervecero.
CE - 4	Publicaciones que mencionan el bagazo, pero no analizan una ruta de valorización ni aportan resultados diferenciados.
CE - 5	Estudios sin información útil sobre alimentos, energía, combustibles, biomateriales o beneficios ambientales.

Los 57 artículos que superaron los filtros iniciales se revisaron según su relación con el tema, la ruta de valorización estudiada y los sectores incluidos en la investigación. Se aceptaron los trabajos con información suficiente para

responder al menos una pregunta específica. Al final, 21 artículos formaron parte de la síntesis.

La Fig. 1 muestra el recorrido completo, desde la identificación de los registros hasta la selección final de los estudios.

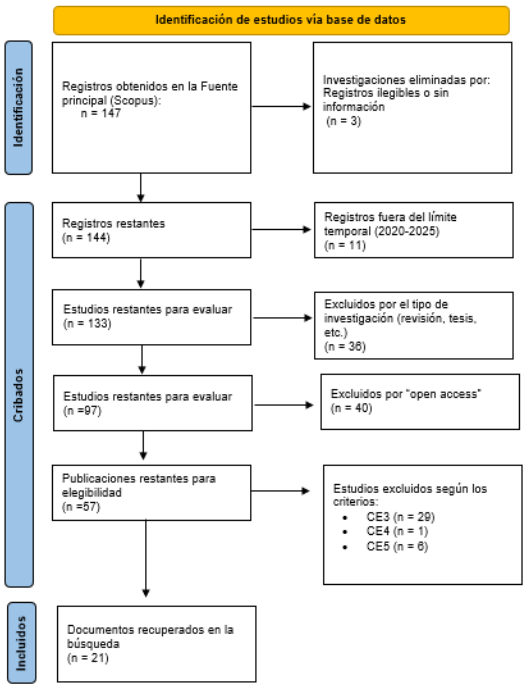


Fig. 1. Diagrama de flujo PRISMA

III. Resultados

La revisión reunió 21 artículos. En conjunto, estos trabajos aportaron datos sobre los problemas ambientales ligados a la generación y el manejo del bagazo cervecero, las formas de aprovecharlo, los productos obtenidos, los beneficios ambientales y las barreras que dificultan su aplicación dentro de la economía circular.

RQ1: ¿Qué impactos ambientales se asocian con la generación, almacenamiento y manejo inadecuado del bagazo cervecero?

El bagazo cervecero (BC) es el principal residuo sólido de la elaboración de cerveza y representa alrededor del 85 % de los subproductos del proceso. Por cada hectolitro de cerveza se generan entre 20 y 27 kg de bagazo húmedo. A escala mundial, esto equivale a unos 37–40 millones de toneladas al año [4], [7], [10], [11], [16]–[18]. El problema ambiental no depende solo de esa cantidad. También influyen la forma de almacenarlo, la distancia de transporte, el tratamiento que recibe y el destino final.

El BC suele contener entre 70 % y 80 % de humedad. Además, sus proteínas y carbohidratos fermentables favorecen el crecimiento de microorganismos y aceleran su deterioro. Por esta razón, dura poco tiempo almacenado, produce malos olores y debe secarse, refrigerarse o procesarse poco después de salir de la cervecería [9], [10], [13], [16]–[20]. Cuando no hay una salida rápida, puede acumularse o terminar en un vertedero, lo que aumenta la carga de los sistemas que gestionan residuos orgánicos.

Enviar el bagazo a un vertedero también genera gases de efecto invernadero. El estudio [16] calculó una huella cercana a 3,01 kg de CO_2 equivalente por cada kilogramo de bagazo sin procesar que se deposita allí. El compostaje controlado puede emitir CO_2 y N_2O, aunque el estudio [17] registró cantidades de CH_4 casi insignificantes bajo condiciones aeróbicas. Por lo tanto, no todas las formas de descomposición liberan los mismos gases ni en la misma cantidad. El resultado cambia con el tratamiento, la aireación, la humedad y la mezcla empleada.

Un manejo deficiente también puede afectar el suelo y las aguas subterráneas. Si los residuos orgánicos llegan al alcantarillado, aumenta la demanda química de oxígeno y se favorece la eutrofización de ríos y lagos [21]. La disposición sin control, por su parte, se relaciona con contaminación del suelo y del agua, presencia de vectores y riesgos sanitarios [10], [11]. El bagazo almacenado también produce olores durante su degradación, un problema especialmente molesto en zonas urbanas donde hay poco espacio para guardarlo [13], [19].

No aprovechar el bagazo significa perder materia orgánica, nutrientes y energía que todavía tienen valor. Con este residuo se pueden producir biogás, hidrógeno, combustibles sólidos, biochar, fertilizantes, azúcares, aminoácidos, adsorbentes y materiales de construcción [3], [7], [10], [11], [13], [20], [22]–[24]. El análisis de ciclo de vida de [25] señala que integrar digestión anaerobia o gasificación con un tratamiento adecuado de los residuos puede reducir las emisiones entre 25,90 % y 45,68 % frente a las prácticas convencionales. Esa ventaja puede reducirse si el proceso exige largas distancias de transporte, secado intensivo o un uso elevado de energía, agua y reactivos [10], [16], [19], [20], [23].

Cuadro 4
Impactos ambientales

Impacto ambiental	Artículos que lo abordan
Emisiones de GEI por vertido, degradación o tratamiento	[11], [16]–[18], [25]
Contaminación del suelo, aguas subterráneas y ecosistemas acuáticos	[10], [11], [18], [19], [21]
Olores, proliferación microbiana y vectores	[6], [9]–[11], [13], [16]–[20]

Generación y acumulación masiva de residuos orgánicos	[3], [4], [6]–[13], [16]–[18], [20]–[24]
Desperdicio de energía, nutrientes y materiales aprovechables	[3], [4], [7], [8], [10], [11], [13], [17]–[25]
Incremento de la huella de carbono en sistemas no circulares	[11], [16], [23], [25]
Emisiones y consumo de combustible durante el transporte	[4], [10], [13], [16], [19], [23]
Consumo energético asociado con el secado y la estabilización	[9], [10], [16], [18]–[20], [23]
Generación de impactos secundarios durante la valorización	[10], [16], [17], [20], [23]–[25]
Dependencia de recursos fósiles o materias primas vírgenes	[6], [8]–[11], [13], [20], [23], [25]

Cuadro 5
Factores condicionantes

Factor condicionante	Artículos que lo abordan
Elevada y continua generación	[3], [4], [6]–[13], [16]–[25]
Alto contenido de humedad y nutrientes fermentables	[6], [9], [10], [13], [16]–[20], [23]
Necesidad de secado, refrigeración o estabilización inmediata	[6], [9], [10], [13], [16]–[20], [23]
Costos de transporte y limitaciones de almacenamiento	[4], [9], [10], [13], [16], [18], [19], [23]
Variabilidad de composición y propiedades	[6]–[9], [11], [12], [16], [18]–[20], [23]
Estructura lignocelulósica recalcitrante	[3], [7], [8], [11], [13], [21]
Necesidad de pretratamientos y acondicionamiento	[3], [4], [7]–[13], [18], [20], [21], [23], [24]
Limitada madurez industrial y dificultades de escalamiento	[3], [4], [6]–[11], [13], [16], [19]–[21], [23]–[25]
Falta de infraestructura e inversión, especialmente en pequeñas cervecerías	[10], [11], [16], [19], [21], [25]
Bajo valor comercial y demanda insuficiente	[4], [6]–[8], [10], [13], [16], [17], [19]
Débil coordinación entre generadores, recolectores y usuarios	[13], [19]
Ubicación urbana o lejanía de zonas agrícolas	[4], [13], [16], [19]
Consumo de energía, agua y reactivos en las rutas de valorización	[3], [10], [16], [20], [23]–[25]
Exigencias regulatorias, sanitarias y de calidad	[4], [9], [13], [18], [19], [25]

RQ2: ¿Qué estrategias se utilizan para valorizar el bagazo cervecero en alimentos e ingredientes, energía, combustibles y biomateriales?

Los artículos revisados describen rutas alimentarias, energéticas, termoquímicas y de producción de materiales. Todas buscan usar las proteínas, los carbohidratos, los compuestos fenólicos y la fracción lignocelulósica del bagazo antes de enviarlo a un vertedero.

En alimentos e ingredientes, la hidrólisis con agua subcrítica permite recuperar azúcares fermentables y aminoácidos [3]. La extracción supercrítica, en cambio, sirve para obtener compuestos fenólicos y antioxidantes [8]. También existen procesos que combinan agua caliente y fraccionamiento para separar proteínas, azúcares, celulosa y lignina [13]. Otras propuestas convierten el bagazo en ingredientes para consumo humano [19] o aplican una torrefacción moderada para producir un colorante que sustituya parte de la malta oscura usada en la cerveza [23].

Las rutas energéticas incluyen la gasificación para producir hidrógeno verde [4], la fermentación oscura para obtener biohidrógeno y ácidos carboxílicos [7], y la digestión anaerobia para generar metano y biogás [7], [11], [25]. Otros estudios evalúan la combustión directa en calderas, la generación conjunta de calor y electricidad [10] y la torrefacción para fabricar combustibles sólidos con mejores propiedades [23]. La pirólisis ofrece otra opción: produce biochar junto con biogás, gas de síntesis y bioaceite [12], [16].

Usar el bagazo como fuente de energía puede reducir parte del consumo de combustibles fósiles. En [11], la digestión anaerobia seca podría cubrir cerca del 7,38 % de la electricidad y el 6,86 % del calor que necesita una cervecería. El estudio de ciclo de vida [25] también registró reducciones de emisiones de 25,90 % con digestión anaerobia y de 45,68 % con gasificación. Estos porcentajes corresponden a sistemas que tratan de forma conjunta residuos sólidos y aguas residuales; por eso, no pueden atribuirse solo al bagazo.

En el campo de los biomateriales, el bagazo se ha probado como agregado lignocelulósico para construcción [6], materia prima para tableros sin adhesivos sintéticos [9] y fuente de lignina para elaborar aditivos que reducen el uso de agua en mezclas de cemento [13]. También puede transformarse en

biochar [12], [16], biosorbentes que retiran uranio y tierras raras del agua [24], y carbón activado o nanotubos de carbono para adsorber metales pesados [20]. Estas aplicaciones podrían ahorrar materias primas vírgenes, aunque aún faltan análisis de ciclo de vida que comparen su huella con la de los materiales convencionales.

El compostaje y el co-compostaje convierten el bagazo en fertilizantes y enmiendas orgánicas [17], [18], [22]. Así, parte de los nutrientes vuelve al suelo y puede disminuir el uso de fertilizantes químicos. El resultado depende de controlar bien la humedad, la aireación, la composición de la mezcla y la frecuencia de volteo, ya que el proceso también puede emitir CO_2 y N_2O [17].

La opción que mejor aprovecha el residuo es una biorrefinería en cascada. Primero se recuperan los componentes de mayor valor, como proteínas, compuestos fenólicos, azúcares y aminoácidos. Luego, las fracciones restantes se usan para producir energía, combustibles o biomateriales [3], [8], [13]. Aun así, el beneficio ambiental puede reducirse por la energía consumida durante el secado, el transporte, los reactivos empleados y los residuos secundarios que se generan [10], [16], [20], [23].

Cuadro 6
Estrategias tecnológicas

Estrategia tecnológica	Productos obtenidos	Artículos
Alimentos e ingredientes		
Hidrólisis con agua subcrítica	Azúcares y aminoácidos	[3]
Extracción supercrítica	Compuestos fenólicos y antioxidantes	[8]
Extracción con agua caliente y fermentación	Proteínas, azúcares, biomasa microbiana y lípidos	[13]
Transformación para alimentación humana	Harinas e ingredientes alimentarios propuestos	[19]
Torrefacción moderada	Colorante para cerveza	[23]
Energía y combustibles		
Gasificación y separación por membranas	Hidrógeno verde de alta pureza	[4]
Fermentación oscura y acidogénica	Biohidrógeno y ácidos carboxílicos	[7]
Digestión anaerobia	Metano, biogás, electricidad y calor	[7], [11], [25]
Combustión y cogeneración	Vapor, calor y electricidad	[10]
Torrefacción	Combustible sólido densificado	[23]
Pirólisis	Biochar, bioaceite y gas de síntesis	[12], [16]
Biomateriales		
Incorporación como agregado	Materiales de construcción	[6]
Termocompresión	Tableros de partículas	[9]
Fraccionamiento de lignina	Aditivos reductores de agua para cemento	[13]
Tratamiento hidrotermal	Biosorbentes para uranio y tierras raras	[24]
Activación química y pirólisis	Carbón activado y nanotubos de carbono	[20]
Productos agrícolas		
Compostaje y co-compostaje	Compost, fertilizantes y enmiendas orgánicas	[17], [18], [22]

RQ3: ¿Qué beneficios ambientales se reportan mediante la aplicación de estas estrategias de valorización?

Los estudios relacionan el aprovechamiento del bagazo con menos emisiones de gases de efecto invernadero, menos residuos en vertederos, recuperación de energía y nutrientes, protección del agua y menor consumo de materias primas convencionales. Sin embargo, la mayor parte de los datos ambientales medidos se concentra en [16], [25] y [11]. Los demás trabajos suelen plantear beneficios posibles a partir del uso del residuo o del reemplazo de productos convencionales.

Uno de los beneficios mejor documentados es la reducción de emisiones. Convertir el bagazo en biochar produjo una huella de 1,18 kg de CO_2 equivalente por kilogramo, frente a los 3,01 kg calculados para su disposición en vertedero [16]. La digestión anaerobia seca también puede evitar cerca de 0,0099 t de CO_2 equivalente por tonelada de bagazo al generar electricidad y 0,0335 t al recuperar calor [11]. En [25], las emisiones disminuyeron 25,90 % con digestión anaerobia y 45,68 % con gasificación. Como estos escenarios incluyen residuos sólidos y aguas residuales, las reducciones no corresponden únicamente al bagazo.

Producir hidrógeno, metano, biogás, calor y combustibles sólidos permite reemplazar una parte de las fuentes fósiles [4], [7], [10], [11], [23]. La combustión del bagazo en calderas, por ejemplo, reduce el uso de astillas de madera y puede aliviar la presión sobre los recursos forestales [10]. La gasificación y la digestión anaerobia también permiten aprovechar la energía dentro de la cervecería. Esto disminuye la compra de energía externa y puede evitar costos y emisiones de transporte.

Otro beneficio es que menos materia orgánica termina en los vertederos. La extracción, fermentación, hidrólisis, pirólisis, fabricación de materiales y el compostaje convierten el bagazo en productos útiles y mantienen sus componentes dentro del sistema productivo por más tiempo [3], [8], [9], [11]–[13], [16]–[18], [22], [23]. El proceso de fraccionamiento descrito en [13], por ejemplo, convirtió entre el 75 % y el 80 % de la masa inicial en productos con valor industrial. Es un resultado cercano al aprovechamiento en cascada y con pocos residuos.

Aprovechar el bagazo también ayuda a proteger el suelo y el agua, porque evita su vertido y la liberación de materia orgánica con alta demanda química de oxígeno [10], [11], [21]. Algunos materiales derivados sirven, además, para limpiar aguas contaminadas. El biosorbente tratado por vía hidrotermal alcanzó capacidades máximas de 221 mg/g para uranio y de

38–68 mg/g para ciertos elementos de tierras raras [24]. El carbón activado obtenido del bagazo, por su parte, retiró hasta el 77 % del plomo durante la primera hora de tratamiento [20].

En agricultura, el compostaje y el co-compostaje recuperan nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica para producir fertilizantes y enmiendas [17], [18], [22]. Estos productos pueden mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo y reducir parte del uso de fertilizantes sintéticos. El proceso requiere controlar la humedad, la aireación, la relación entre carbono y nitrógeno y la frecuencia de volteo, pues también puede liberar CO_2 y N_2O [17].

El bagazo también puede reemplazar parte de la madera, los agregados minerales, los adhesivos sintéticos y otras materias primas cuando se incorpora en tableros, materiales de construcción, aditivos para cemento, biochar y materiales carbonosos [6], [9], [12], [13], [20], [24]. Esto reduce la extracción de recursos y mantiene durante más tiempo el carbono de origen biológico. No obstante, varios estudios todavía no cuentan con análisis de ciclo de vida que prueben si estos nuevos materiales dejan una huella menor que sus equivalentes convencionales.

Cuadro 7
Beneficios ambientales

Beneficio ambiental	Evidencia reportada	Artículos
Reducción de gases de efecto invernadero	Menor huella frente al vertido y emisiones evitadas mediante energía renovable	[11], [16], [25]
Sustitución de combustibles fósiles	Producción de hidrógeno, metano, biogás, electricidad, calor y combustibles sólidos	[4], [7], [10], [11], [23], [25]
Reducción de residuos enviados a vertederos	Transformación del bagazo en energía, ingredientes, fertilizantes y materiales	[3], [8], [9], [11]–[13], [16]–[18], [22], [23]
Aprovechamiento integral del residuo	Recuperación sucesiva de proteínas, azúcares, compuestos fenólicos, celulosa y lignina	[3], [8], [13]
Protección del suelo y aguas subterráneas	Prevención del vertido y de la degradación descontrolada de materia orgánica	[10], [11], [21]
Tratamiento de aguas contaminadas	Adsorción de uranio, tierras raras y plomo	[20], [24]
Reciclaje de nutrientes	Producción de compost, fertilizantes y enmiendas orgánicas	[17], [18], [22]
Conservación de materias primas	Sustitución parcial de madera, agregados, combustibles y materiales sintéticos	[6], [9], [10], [12], [13], [20]
Reducción de impactos toxicológicos	Menores valores de toxicidad humana, ecotoxicidad y formación de ozono en escenarios integrados	[25]
Disminución del transporte	Aprovechamiento del bagazo dentro o cerca de las instalaciones cerveceras	[4], [10], [11], [23]

RQ4. ¿Qué etapas conforman la implementación de las estrategias de valorización del bagazo cervecero y qué limitaciones condicionan su adopción desde un enfoque de economía circular?

Aplicar una estrategia circular exige coordinar varias etapas. La primera es conocer el residuo: cuánto se genera, con qué frecuencia, cuánta humedad contiene y cuál es su composición. Estas características cambian según el cereal y las condiciones de malteado y maceración [8], [9], [16]. Con esos datos se elige la ruta más adecuada. Cuando es posible, conviene trabajar en cascada: recuperar primero proteínas, azúcares, aminoácidos o compuestos fenólicos y usar después el material restante para obtener energía, combustibles o materiales [8], [13], [23].

La recolección, la estabilización, el almacenamiento y el transporte son etapas decisivas. El BC suele tener entre 67 % y 81 % de humedad, por lo que puede fermentar, desarrollar microorganismos y deteriorarse en poco tiempo [9], [18], [20], [23]. Debe procesarse pronto o conservarse mediante deshidratación, secado o refrigeración. El secado, sin embargo, consume energía, eleva los costos y puede restar parte de la ventaja ambiental [9], [10], [16], [18], [23]. El peso del bagazo húmedo también limita el transporte. El estudio [4] encontró dificultades por encima de unos 20–30 km, aunque la distancia viable cambia según cada lugar.

Antes de la conversión suelen aplicarse pretratamientos como molienda, secado, hidrólisis o tratamientos térmicos, químicos, enzimáticos e hidrotermales [3], [8], [12], [13], [21], [24]. La lignina y la estructura resistente del BC dificultan la liberación de azúcares, la biodegradación y la producción de metano. Por ello, algunas rutas requieren altas temperaturas, presión o reactivos [3], [11], [21]. Después viene la conversión mediante fermentación, digestión anaerobia, combustión, gasificación, pirólisis, compostaje, extracción o fabricación de biomateriales [4], [6], [7], [9]–[11], [13], [17], [18], [20], [22]–[24].

Al final se separan y purifican los productos, se comprueba su calidad y se integra el proceso en la cervecería o en una cadena de suministro. Los alimentos necesitan inocuidad, composición uniforme, suministro constante y aceptación del consumidor. Los fertilizantes, combustibles y materiales, por su parte, deben cumplir normas técnicas propias [18], [19], [22]. También hace falta coordinar a cervecerías, recolectores, transformadores y compradores. La falta de una logística

organizada es una barrera importante, sobre todo para las microcervecerías [19].

Las barreras más frecuentes son la humedad y la rápida degradación del BC, el costo de secarlo y transportarlo, las variaciones en su composición, la resistencia de la fracción lignocelulósica, la inversión necesaria, la falta de infraestructura y el escaso escalamiento de algunas tecnologías. El compostaje y la digestión anaerobia tienen mayor madurez, pero varias rutas para producir hidrógeno, compuestos químicos, biosorbentes y materiales avanzados siguen en laboratorio o planta piloto [3], [9], [11], [16], [20], [21], [23], [24]. No hay una solución única. La elección depende del volumen, la ubicación, el mercado, la infraestructura y el balance ambiental. Un análisis de ciclo de vida ayuda a comprobar que el beneficio no se pierda por la energía, el transporte, los reactivos o los residuos secundarios [16], [25].

Cuadro 8

Etapas de implementación de las estrategias de valorización del bagazo cervecero

Etapa	Criterio de economía circular	Artículos
1. Caracterización y diagnóstico	Seleccionar la ruta según las características reales del residuo	[8], [9], [13], [16], [19]
2. Selección de la ruta	Priorizar recuperación de mayor valor y uso en cascada	[8], [13], [21], [23]
3. Separación y recolección	Evitar contaminación del BC y facilitar su trazabilidad	[13], [19]
4. Estabilización y logística	Reducir deterioro, pérdidas y distancias de traslado	[4], [6], [9], [10], [13], [16]–[20], [23]
5. Pretratamiento	Facilitar el fraccionamiento y aumentar el rendimiento	[3], [8], [12], [13], [16], [20], [21], [23], [24]
6. Conversión	Transformar el residuo en productos, energía o materias primas secundarias	[4], [6], [7], [9]–[11], [13], [17], [18], [20], [22]–[24]
7. Purificación y acondicionamiento	Obtener productos seguros y técnicamente utilizables	[3], [4], [8], [13], [19], [20], [23], [24]
8. Escalamiento e integración	Favorecer el aprovechamiento local y la simbiosis industrial	[3], [9]–[11], [16], [21], [23], [25]
9. Comercialización y evaluación	Cerrar el ciclo sin trasladar impactos a otras etapas	[16], [18]–[20], [22], [25]

Cuadro 9

Limitaciones para la implementación

Limitación	**Manifestación o efecto**	**Etapas afectadas**	**Artículos**
Elevada humedad y rápida degradación	Fermentación, olores, crecimiento microbiano y corta vida útil	Recolección, almacenamiento y transporte	[6], [9], [10], [13], [16]–[20], [23]
Alto consumo energético del secado	Incrementa costos y puede disminuir el beneficio ambiental	Estabilización y pretratamiento	[9], [10], [16], [18], [20], [21], [23]
Costos de transporte y almacenamiento	El peso del BC húmedo limita el traslado a largas distancias	Logística e integración territorial	[4], [9], [10], [13], [16], [19], [23]
Variabilidad de composición	Produce rendimientos y propiedades finales poco uniformes	Caracterización, conversión y control de calidad	[8], [9], [12], [16], [19]
Resistencia lignocelulósica	Limita la hidrólisis, la biodegradación y la producción de metano	Pretratamiento y conversión biológica	[3], [7], [8], [11], [13], [21]
Necesidad de infraestructura e inversión	Requiere secadores, reactores, sistemas de purificación o adaptación de calderas	Pretratamiento, conversión y escalamiento	[4], [9]–[11], [16], [19], [23]
Escalamiento industrial limitado	Numerosas alternativas continúan en escala de laboratorio o piloto	Conversión e integración industrial	[3], [9], [11], [16], [20], [23], [24]
Requisitos de calidad e inocuidad	Necesidad de estandarización, trazabilidad y validación del producto	Acondicionamiento y comercialización	[9], [12], [18], [19], [22]
Exigencias regulatorias	Licencias y normas diferentes según el uso alimentario, agronómico o material	Comercialización y uso final	[18], [19], [22]
Falta de coordinación de la cadena	Dificultades para sincronizar generación, recolección, transformación y demanda	Todas las etapas logísticas y comerciales	[13], [19]
Uso de reactivos y generación de residuos secundarios	Posible traslado de impactos hacia efluentes, cenizas o adsorbentes agotados	Pretratamiento, conversión y fin de vida	[10], [16], [20], [23], [25]

Incertidumbre económica y ambiental	El beneficio depende de la escala, energía, transporte y sustitución efectiva de productos	Diseño, escalamiento y evaluación	[11], [16], [19], [23], [25]

IV. Discusión

Los trabajos revisados presentan al bagazo cervecero (BC) desde dos lados. Puede convertirse en un problema ambiental si se maneja mal, pero también es una materia prima que conserva valor. Su humedad y rápida degradación complican el almacenamiento y el transporte, y pueden provocar olores, emisiones y daños en el suelo o el agua [9]–[11], [16]–[18]. El efecto cambia según el tratamiento. En el compostaje aeróbico controlado, por ejemplo, las emisiones de metano fueron casi insignificantes [17].

Las alternativas encontradas van desde alimentos e ingredientes hasta hidrógeno, biogás, calor, combustibles sólidos, fertilizantes, materiales de construcción, tableros, biochar y biosorbentes [3], [4], [6]–[13], [17]–[19], [22]–[24]. Las rutas en cascada encajan mejor con la economía circular: recuperan primero los compuestos de mayor valor y destinan el resto a energía o materiales [8], [13], [23].

Los beneficios que aparecen con mayor frecuencia son menos emisiones, menor uso de combustibles fósiles y materias primas vírgenes, menos residuos en vertederos y recuperación de nutrientes. Al convertir el BC en biochar, la huella bajó de unos 3,01 a 1,18 kg de CO_2 equivalente por kilogramo de bagazo [16]. La digestión anaerobia también mostró que puede generar electricidad y calor y, al mismo tiempo, evitar emisiones [11]. Pese a ello, muchos estudios sobre alimentos y biomateriales prueban la viabilidad técnica, pero no miden el beneficio con un análisis completo de ciclo de vida.

Pasar del laboratorio a la práctica sigue siendo difícil. Los principales frenos son el costo del secado, el almacenamiento y el transporte, la variación del BC, su estructura lignocelulósica, la inversión necesaria y el bajo nivel de escalamiento de ciertas tecnologías [3], [4], [9], [11], [16], [23]. También se necesita coordinación entre cervecerías, recolectores, transformadores y compradores, además de cumplir las normas de inocuidad, calidad y regulación [18], [19], [22].

El BC ofrece oportunidades ambientales y productivas, pero ninguna ruta es favorable por sí sola. La decisión debe tomar en cuenta cuánto residuo se genera, qué tan cerca están las plantas, cuánta energía consume el proceso, si existe mercado para el producto y cómo se manejarán los residuos secundarios. Faltan evaluaciones de ciclo de vida, análisis tecnoeconómicos y ensayos industriales que comparen las alternativas con los mismos criterios y muestren cuáles cierran de verdad los ciclos de materiales y energía.

V. Conclusiones

Los estudios revisados muestran que el bagazo cervecero no es solo un residuo industrial. Su contenido de fibras, proteínas y compuestos bioactivos permite usarlo como materia prima para obtener alimentos e ingredientes, energía renovable, combustibles, fertilizantes y biomateriales.

Sus principales problemas ambientales nacen del gran volumen generado, la humedad y la rápida degradación. Si se acumula o se elimina sin tratamiento, puede producir malos olores, gases de efecto invernadero y contaminación del suelo y del agua. La magnitud del daño depende de cómo se almacena, se transporta y se trata.

El bagazo puede aprovecharse mediante extracción e hidrólisis de compuestos, fermentación, digestión anaerobia, combustión, gasificación, pirólisis, compostaje y fabricación de materiales. Las rutas en cascada aprovechan mejor el residuo porque recuperan primero los componentes de mayor valor y usan después las fracciones restantes para generar energía u otros productos.

Entre los beneficios se encuentran la reducción de residuos enviados a vertederos, la disminución de emisiones, la recuperación de energía y nutrientes y el reemplazo parcial de combustibles fósiles y materias primas vírgenes. Estas ventajas pueden reducirse si el secado consume demasiada energía, el transporte es largo, se usan muchos reactivos o aparecen residuos secundarios.

Llevar estas alternativas a una escala mayor exige resolver la humedad y la variación del bagazo, los costos de conservación y transporte, la falta de infraestructura, el escalamiento industrial y las normas de calidad e inocuidad. La ruta adecuada dependerá del volumen disponible, la ubicación de la cervecería, los recursos de la zona y la demanda del producto final.

Aún hacen falta análisis de ciclo de vida, evaluaciones tecnoeconómicas y pruebas industriales que permitan comparar las rutas con criterios comunes. También se necesita una mejor coordinación entre cervecerías, empresas transformadoras y usuarios finales para construir cadenas de valor que mantengan los materiales y la energía dentro del sistema durante más tiempo.

REFERENCIAS

[1] A. Zeko-Pivač *et al.*, "The potential of brewer's spent grain in the circular bioeconomy: State of the art and future perspectives," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 10, Art. no. 870744, Jun. 2022, doi: 10.3389/fbioe.2022.870744.

[2] D. Agrawal, D. Gopaliya, N. Willoughby, S. K. Khare, and V. Kumar, "Recycling potential of brewer's spent grains for circular biorefineries," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 40, Art. no. 100748, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.cogsc.2022.100748.

[3] W. G. Sganzerla *et al.*, "Recovery of sugars and amino acids from brewers' spent grains using subcritical water hydrolysis in a single and two sequential semi-continuous flow-through reactors," *Food Res. Int.*, vol. 157, Art. no. 111470, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.foodres.2022.111470.

[4] D. Alique *et al.*, "Green hydrogen production by brewery spent grain valorization through gasification and membrane separation towards fuel-

cell grade purity," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 142, pp. 9–25, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.05.143.

[5] A. C. Blaga, R. H. Hanu Cimpoesu, R. E. Tataru-Fărmuş, and D. Şuteu, "Eco-friendly biosorbents from biopolymers and food waste for efficient dye removal from wastewater," *Polymers*, vol. 17, no. 3, Art. no. 291, Jan. 2025, doi: 10.3390/polym17030291.

[6] B. El Haddaji, M. H. Benzaama, M. Quiertant, and Y. El Mendili, "Insight into the use of brewers' spent grain as a low-carbon aggregate in building materials," *Biomimetics*, vol. 9, no. 12, Art. no. 781, Dec. 2024, doi: 10.3390/biomimetics9120781.

[7] J. Pérez-Barragán *et al.*, "Brewery spent grain valorization through fermentation: Targeting biohydrogen, carboxylic acids and methane production," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 191, pp. 206–217, 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.08.071.

[8] S. Lisci *et al.*, "Valorizing brewer's spent grain: A sequential pathway of supercritical extraction, hydrolysis, and fermentation," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 285, Art. no. 119620, 2024, doi: 10.1016/j.ces.2023.119620.

[9] L. Rossi, L. Wechsler, M. A. Peltzer, E. M. Ciannamea, R. A. Ruseckaite, and P. M. Stefani, "Sustainable particleboards based on brewer's spent grains," *Polymers*, vol. 16, no. 1, Art. no. 59, Jan. 2024, doi: 10.3390/polym16010059.

[10] L. E. N. Castro *et al.*, "Application of brewers' spent grains as an alternative biomass for renewable energy generation in a boiler combustion process," *Sustain. Chem. Environ.*, vol. 4, Art. no. 100039, 2023, doi: 10.1016/j.scenv.2023.100039.

[11] W. G. Sganzerla, J. M. Costa, M. Tena, L. S. Buller, S. I. Mussatto, and T. Forster-Carneiro, "Dry anaerobic digestion of brewer's spent grains toward a more sustainable brewery: Operational performance, kinetic analysis, and bioenergy potential," *Fermentation*, vol. 9, no. 1, Art. no. 2, Jan. 2023, doi: 10.3390/fermentation9010002.

[12] A. K. Bhakta, Y. Snoussi, M. El Garah, S. Ammar, and M. M. Chehimi, "Brewer's spent grain biochar: Grinding method matters," *C*, vol. 8, no. 3, Art. no. 46, Sep. 2022, doi: 10.3390/c8030046.

[13] C. Allegretti *et al.*, "Towards a complete exploitation of brewers' spent grain from a circular economy perspective," *Fermentation*, vol. 8, no. 4, Art. no. 151, Apr. 2022, doi: 10.3390/fermentation8040151.

[14] C. M. da Costa Santos, C. A. de Mattos Pimenta, and M. R. C. Nobre, "The PICO strategy for the research question construction and evidence search," *Rev. Latino-Am. Enfermagem*, vol. 15, no. 3, pp. 508–511, 2007, doi: 10.1590/s0104-11692007000300023.

[15] M. J. Page *et al.*, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, Art. no. n71, 2021, doi: 10.1136/bmj.n71.

[16] E. Newman, N. Nitin, E. S. Spang, and G. P. Fox, "Carbon footprint assessment on the viability of utilizing brewer's spent grain to produce biochar," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 10, Art. no. 5525, May 2025, doi: 10.3390/app15105525.

[17] D. Assandri, G. Giacomello, A. Bianco, G. Zara, M. Budroni, and N. Pampuro, "Environmental sustainability of brewers' spent grains composting: Effect of turning strategies and mixtures composition on greenhouse gas emissions," *Agronomy*, vol. 15, no. 4, Art. no. 771, Mar. 2025, doi: 10.3390/agronomy15040771.

[18] D. Assandri, N. Pampuro, G. Zara, A. Bianco, E. Cavallo, and M. Budroni, "Co-composting of brewers' spent grain with animal manures and wheat straw: Influence of two composting strategies on compost quality," *Agronomy*, vol. 11, no. 7, Art. no. 1349, Jul. 2021, doi: 10.3390/agronomy11071349.

[19] G. Petiti *et al.*, "Operationalizing circular economy: Reflections on a by-product upcycling value chain construction in the brewing sector," *Int. Food Agribus. Manag. Rev.*, vol. 25, no. 5, pp. 803–817, 2022, doi: 10.22434/IFAMR2021.0154.

[20] A. I. Osman *et al.*, "Upcycling brewer's spent grain waste into activated carbon and carbon nanotubes for energy and other applications via two-stage activation," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 95, no. 1, pp. 183–195, Jan. 2020, doi: 10.1002/jctb.6220.

[21] S. A. da Costa, R. B. W. Evaristo, M. L. da Silva, P. R. S. Braga, and G. F. Ghesti, "Prospecção tecnológica e científica de bioprocessos de conversão do bagaço de malte com ênfase em compostagem e biodigestão," *Rev. Virtual Quim.*, vol. 16, no. 1, pp. 116–126, 2024, doi: 10.21577/1984-6835.20230058.

[22] D. Assandri *et al.*, "Enhancing fertilizer effect of bioprocessed brewers' spent grain by microbial consortium addition," *Agronomy*, vol. 13, no. 10, Art. no. 2654, Oct. 2023, doi: 10.3390/agronomy13102654.

[23] M. Jackowski *et al.*, "Synergetic co-production of beer colouring agent and solid fuel from brewers' spent grain in the circular economy perspective," *Sustainability*, vol. 13, no. 18, Art. no. 10480, Sep. 2021, doi: 10.3390/su131810480.

[24] Y. Su *et al.*, "Mild hydrothermally treated brewer's spent grain for efficient removal of uranyl and rare earth metal ions," *RSC Adv.*, vol. 10, no. 73, pp. 45116–45129, 2020, doi: 10.1039/d0ra08164g.

[25] F. Drosou, T. Kekes, C. J. Boukouvalas, V. P. Oikonomopoulou, and M. K. Krokida, "Life cycle assessment of innovative methods for treating wastewater and solid wastes: A case study focusing on their application within the brewing sector," *Sustain. Food Technol.*, vol. 2, no. 5, pp. 1476–1489, 2024, doi: 10.1039/d4fb00197d.