

APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DEL LACTOSUERO: OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS PARA LA ECONOMÍA CIRCULAR

Laz-Mero, Mabel¹
Tuárez-Párraga, Miguel Alejandro²
Córdova-Mosquera, Alexandra³
Panchana-Cedeño, Ramona⁴
Solórzano Zambrano, Liceth⁵
Gavilanes-López, Pablo⁶
Cedeño-Carpio, Xavier⁷

Recibido: 13/11/2023 Revisado: 22/08/2024 Aceptado: 23/09/2024
<https://doi.org/10.53766/Agroalim/2024.30.59.08>

¹ Estudiante del programa de Doctorado en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria (Universidad Nacional de Cuyo, Argentina); Mg. en Agroindustria (Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López-ESPAM MFL, Ecuador); Ingeniera Química Industrial (Universidad Técnica de Manabí-UTM, Ecuador). Docente tiempo completo en el Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí; Investigador (Investigador Acreditado-REG-INV-22-05557); experiencia en industria y educación superior. *Dirección postal:* Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo 130104, Ecuador. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-7681-6351>. *Teléfono:* +593 994607822; *e-mail:* mabel.laz@utm.edu.ec

² Estudiante del programa de Doctorado en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria (Universidad Nacional de Cuyo-UNCUYO, Argentina); M.Sc. en Agroindustria (Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López-ESPAM MFL, Ecuador); Ingeniero Industrial (Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí-ULEAM, Ecuador). Investigador Acreditado por la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación-SENESCYT, REG-INV-22-05557; Especialista en diseño y desarrollo de empaques en la empresa La Fabril S.A. *Dirección postal:* La Fabril S.A., Km 5.5 Vía Manta- Montecristi, 130216, Ecuador. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-6992-248X>. *Teléfono:* +593 985990879; *e-mail:* alejandro_tuarez@hotmail.com

³ Doctora en Ciencias Técnicas (Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría-CUJAE, Cuba); M.Sc. en Administración Ambiental (Universidad de Guayaquil-UG, Ecuador); Ingeniera Química (UG, Ecuador). Profesor Titular del Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí-UTM; Directora fundadora de la carrera de Ingeniería Química de la UTM. *Dirección postal:* Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo 130104, Ecuador. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0003-4299-4798>. *Teléfono:* +593 981750063; *e-mail:* rosa.cordova@utm.edu.ec

⁴ Magíster en Ciencias mención Energía (Escuela Superior Politécnica de Chimborazo-ESPOCH); Diploma Superior en Investigación Científica (Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López-ESPAM MFL, Ecuador); Ingeniero Civil (Universidad Técnica de Manabí-UTM, Ecuador). Directora Regional de la Contraloría de Manabí (2014-2015); Docente Principal Tiempo Completo del Departamento de Construcciones Civiles, Arquitectura y Geología, Universidad Técnica de Manabí; Decana de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí. *Dirección postal:* Departamento de Construcciones Civiles, Arquitectura y Geología, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo 130104, Ecuador. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-0763-5426>. *Teléfono:* +593 997975559; *e-mail:* ramona.panchana@utm.edu.ec

⁵ Doctora en Ciencias Agrarias Alimentarias y Agroambientales (Universidad de Pisa-UniPi, Italia); M.Sc. en Calidad y Seguridad Alimentaria (Universidad del País Vasco-UPV/EHU, España); Ingeniera en Agroindustrias (Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López-ESPAM MFL, Ecuador). Profesor Titular del Departamento de Procesos Agroindustriales de la Universidad Técnica de Manabí; Investigador del Departamento de Procesos Agroindustriales de la Universidad Técnica de Manabí. *Dirección postal:* Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo 130105, Ecuador. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0001-6964-0696>. *Teléfono:* +593 992251343; *e-mail:* liceth.solorzano@utm.edu.ec

⁶ Estudiante del programa de Doctorado en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria (Universidad Nacional de Cuyo-UNCUYO, Argentina); M.Sc. en Agroindustria (Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López-ESPAM MFL, Ecuador); Ingeniero en Alimentos (Universidad Técnica de Ambato-UTA, Ecuador). Docente tiempo completo en la ESPAM MFL, Ecuador. *Dirección postal:* Carrera de Agroindustria de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí «Manuel Félix López», ESPAM MFL, Calceta 131205, Ecuador. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-6133-1247>. *Teléfono:* +593 958713905; *e-mail:* pablo_gavilanes@espm.edu.ec

⁷ Estudiante del programa de Doctorado en Ingeniería de Productos y Procesos de la Industria Alimentaria (Universidad



RESUMEN

El lactosuero es el mayor subproducto obtenido durante el procesamiento de la leche para la fabricación de queso, caracterizado por un alto contenido de nutrientes que se desaprovechan y que en su mayoría se vierten al medio ambiente sin pretratamientos, con sus consecuentes efectos sobre el ambiente. Con base en estas consideraciones, el objetivo principal de este estudio consistió en profundizar en aspectos fundamentales relacionados con la revalorización del lactosuero, por su alto contenido proteico y su importancia en los ámbitos agroalimentario y socioeconómico. La metodología empleada se basó en una revisión sistemática de la literatura científica, que incluyó una minuciosa evaluación de artículos científicos y fuentes estadísticas de los últimos seis años, empleando bases de datos como de alto impacto globales y regionales (Scielo, Redalyc, Scopus, FAO e INEC, entre otras), basado en los Elementos de Información Preferidos para Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis (PRISMA, en inglés). Se analizaron los resultados y las discusiones pertinentes en relación con la producción de lactosuero en Ecuador y las tecnologías de procesamiento disponibles. Asimismo, se resaltó la trascendencia de encontrar aplicaciones sostenibles para el lactosuero, incluyendo su aprovechamiento en la fabricación de bioplásticos, bioproductos, biocombustibles y otros productos beneficiosos tanto para la industria alimentaria como para el medio ambiente. En este contexto, se identificaron y se discutieron algunas limitaciones y desafíos asociados con la utilización del lactosuero a nivel industrial, tales como la gestión de grandes volúmenes de este subproducto y la variabilidad en su valor comercial. Entre las conclusiones se destaca que el lactosuero contiene nutrientes de gran importancia procedentes de la leche, los cuales pueden ser ampliamente aprovechados por diversas industrias, como la alimentaria, química, cosmética y biomédica, según los estudios revisados. Acá es fundamental adoptar una visión completa en cuanto a las limitantes y desafíos relacionados con el aprovechamiento de esta valiosa proteína mediante métodos de extracción y purificación, así como sus aplicaciones en diferentes campos.

Palabras clave: industria láctea, lactosuero, usos del lactosuero, sostenibilidad, economía circular, Ecuador

ABSTRACT

The milk processing in cheese production generates whey as the primary byproduct, which has a high nutrient content. However, it often goes to waste and is mostly discharged into the environment without pretreatment, leading to an environmental pollution problem. Because of its importance, the main objective of this study was to delve into fundamental aspects related to the valorization of whey and its importance in the agri-food and socio-economic fields. The methodology was founded on a systematic review of the scientific literature, including a thorough evaluation of scientific articles and statistical sources from the last six years (using databases such as Scielo, Redalyc, Scopus, FAO, and INEC, among others), based on the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA). Results and relevant discussions regarding whey production in Ecuador and available processing technologies were analyzed. Furthermore, the study emphasized the importance of finding sustainable applications for whey, such as using it in bioplastics, bio-products, biofuels, and other beneficial products for the food industry and the environment. In this context, some limitations and challenges associated with the industrial use of whey were identified and discussed, such as handling large volumes of this byproduct and the variability in its commercial value. Among the conclusions, it was determined that whey contains important nutrients derived from milk, which can be widely utilized by various industries, such as the food, chemical, cosmetic, and biomedical industries, according to the reviewed studies. Here, it is essential to adopt a comprehensive view regarding the constraints and challenges related to harnessing this valuable protein through extraction and purification methods, and its applications in different fields.

Key words: Dairy industry, whey, uses of whey, sustainability, circular economy, Ecuador

Nacional de Cuyo-UNCUYO, Argentina); M.Sc. Gestión de Alimentos y Seguridad Alimentaria (Instituto Politécnico de Leiria-IPL, Leiria, Portugal); Ingeniero en Industrias Agropecuarias (Universidad Técnica de Manabí-UTM, Ecuador). Docente del Departamento de Turismo y Gastronomía de la Facultad de Ciencias Administrativas y Económicas, Universidad Técnica de Manabí. *Dirección postal:* Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo Portoviejo, 130105, Ecuador. *ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-9240-7630>. *Teléfono:* +593 988440628; *e-mail:* xaviercedenocarpio@gmail.com

RÉSUMÉ

Le lactosérum est le principal sous-produit obtenu lors du traitement du lait dans la production de fromage, qui présente une teneur élevée en nutriments gaspillée, et pour la plupart, déversée dans l'environnement sans prétraitement, causant un problème de pollution environnementale. Par conséquent, l'objectif principal de cette étude consistait à approfondir les aspects fondamentaux liés à la valorisation du lactosérum et à son importance dans les domaines agroalimentaires et socio-économiques. La méthodologie utilisée était basée sur une revue systématique de la littérature scientifique, comprenant une évaluation minutieuse d'articles scientifiques et de sources statistiques des six dernières années, en utilisant des bases de données telles que Scielo, Redalyc, Scopus, FAO et INEC, entre autres. Les résultats et les discussions pertinents concernant la production de lactosérum en Équateur et les technologies de traitement disponibles ont été analysés. De plus, l'importance de trouver des applications durables pour le lactosérum, y compris son utilisation dans la fabrication de bioplastiques, de bioproduits, de biocarburants et d'autres produits bénéfiques tant pour l'industrie alimentaire que pour l'environnement, a été soulignée. Dans ce contexte, certaines limitations et défis associés à l'utilisation du lactosérum à l'échelle industrielle ont été identifiés et discutés, tels que la gestion de grandes quantités de ce sous-produit et la variabilité de sa valeur commerciale. Parmi les conclusions, il a été déterminé que le lactosérum contient des nutriments importants provenant du lait, qui peuvent être largement exploités par diverses industries, telles que l'industrie alimentaire, chimique, cosmétique et biomédicale, selon les études examinées. Il est donc essentiel d'avoir une vue d'ensemble des contraintes et des défis liés à l'utilisation de cette protéine précieuse par des méthodes d'extraction et de purification, ainsi que de ses applications dans différents domaines.

Mots-clés : industrie laitière, lactosérum, utilisations du lactosérum, durabilité, économie circulaire, Équateur

RESUMO

O soro de leite é o principal subproduto obtido durante o processamento do leite na produção de queijos, o qual contém um alto teor de nutrientes que é desperdiçado, sendo em sua maioria descartado no meio ambiente sem tratamento prévio, causando um problema de poluição ambiental. Portanto, o principal objetivo deste estudo foi aprofundar nos aspectos fundamentais relacionados à valorização do soro de leite e sua importância do ponto de vista agroalimentar e socioeconômico. A metodologia utilizada baseou-se em uma revisão sistemática da literatura científica, incluindo uma avaliação minuciosa de artigos científicos e fontes estatísticas dos últimos seis anos, utilizando bases de dados como Scielo, Redalyc, Scopus, FAO e INEC, entre outras. Foram analisados os resultados e as discussões relevantes em relação à produção de soro de leite no Equador e às tecnologias de processamento disponíveis. Além disso, foi destacada a importância de encontrar aplicações sustentáveis para o soro de leite, incluindo seu aproveitamento na fabricação de bioplásticos, bioprodutos, biocombustíveis e outros produtos benéficos tanto para a indústria alimentar quanto para o meio ambiente. Nesse contexto, foram identificadas e discutidas algumas limitações e desafios associados ao uso industrial do soro de leite, como o manuseio de grandes volumes desse subproduto e a variabilidade em seu valor comercial. Entre as conclusões, determinou-se que o soro de leite contém nutrientes importantes que podem ser amplamente aproveitados por diversas indústrias, como a alimentícia, química, cosmética e biomédica, de acordo com os estudos revisados. Considerando uma visão abrangente das limitações e desafios relacionados à exploração dessa valiosa proteína por meio de métodos de extração e purificação, bem como suas aplicações em diferentes áreas.

Palavras-chave: indústria de laticínios, soro de leite, usos do soro de leite, sustentabilidade, economia circular, Ecuador

1. INTRODUCCIÓN

La producción de leche y su procesamiento ha aumentado en todo el mundo a un ritmo elevado, con un crecimiento de más del 10 % cada cuatro años (FAO, 2017). La producción mundial de leche supera los 801 millones de toneladas/año y, de esta cantidad, más del 37 % se procesa en queso u otros productos coagulados, mientras que el 30 % se utiliza para producir mantequilla (Panghal *et al.*, 2018). Es esencial destacar que los productos lácteos aportan una mezcla equilibrada de macronutrientes, como lípidos, proteínas e hidratos de carbono, además de micronutrientes como vitaminas, enzimas y minerales, convirtiéndolos en una parte fundamental de la dieta diaria (Tedesco *et al.*, 2021).

Sin embargo, este crecimiento en la producción y procesamiento conlleva un desafío significativo: la gestión de residuos y subproductos alimentarios (Gómez & Sánchez, 2019). Las industrias agroalimentarias se enfrentan a costos considerables relacionados con el tratamiento y la eliminación de estos residuos, debido al aumento en el consumo de alimentos y a las regulaciones medioambientales cada vez más rigurosas (Cossio & Chipana, 2022). Uno de estos subproductos es el suero de queso, que representa la fracción líquida restante después de la coagulación de la leche (Torres-Martínez & Romero-León, 2020). Cada año, la industria láctea genera millones de toneladas de suero, con una sorprendente proporción de aproximadamente 10 litros de suero necesarios para producir tan solo un kg de queso (Arpit *et al.*, 2022).

Investigaciones de Rocha-Mendoza *et al.* (2021) indican que cerca del 90% de la leche utilizada en la fabricación de quesos se convierte en lactosuero, lo que equivale a aproximadamente el 55% de los sólidos totales hidrosolubles. Durante el proceso de elaboración de queso a partir de la leche, se generan residuos en los que se concentra la mayor parte de los compuestos hidrosolubles de la leche, como proteínas del suero (lactoglobulina y lactalbumina), carbohidratos (lactosa), lípidos y nutrientes inorgánicos esenciales como calcio, fósforo, magnesio,

sodio, potasio y cloruro. Estos componentes hacen que el lactosuero sea un recurso valioso en diversas aplicaciones alimentarias y nutricionales (Fournaise, Burgain, Perroud-Thomassin & Petit, 2021). La proporción en la que estos compuestos se encuentran en el lactosuero puede variar debido a diversos factores, como la alimentación del ganado lechero y el tipo de queso producido (Zhao *et al.*, 2023). Lamentablemente, la mayoría de las industrias consideran este suero como un residuo y lo descartan en campos abiertos o ríos, lo que plantea un grave problema medioambiental debido a su alta carga orgánica y la consiguiente contaminación del agua (Rastogi, Priya & Gogate, 2022).

Por otra parte, cabe mencionar que las acciones enfocadas a la reutilización de residuos contribuye a los objetivos de desarrollo sostenible establecidos en la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático prevén acciones a escala mundial que permitan proteger el planeta para las generaciones futuras. Las mismas están directamente relacionadas con la industria alimentaria: hambre cero y agricultura sostenible; salud y bienestar; industria innovación e infraestructuras; medidas contra el cambio climático (Pantoja, Amante, Rodrigues & da Silva, 2022).

En Sudamérica uno de los países más conocidos por su amplia industria láctea desarrollada es Argentina, incluyéndose en el aprovechamiento del lactosuero, mediante la implementación de diferentes tecnologías y procesos para aprovecharlo de manera eficiente (INTI, 2023).

En Ecuador, según el Instituto Nacional de Estadística y Censos, en 2020 la producción diaria de leche bordeó 6,6 millones de litros cada día (INEC-ESPAC, 2021). Con la estimación del 90% en contenido de lactosuero se obtienen unos 5,94 millones de litros al día, siendo una de las industrias más importantes dentro del país (MAG, 2020).

Para garantizar la calidad y seguridad en la producción láctea, las empresas del sector deben cumplir con rigurosos estándares de producción y obtener los permisos necesarios para operar, de acuerdo con las pautas establecidas por la Organización de las

Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019). Con base en estas consideraciones, esta investigación tuvo como objetivo profundizar aspectos fundamentales relacionados con la revalorización del lactosuero y su importancia en los ámbitos agroalimentario y socioeconómico.

2. METODOLOGÍA

Para presentar los resultados de manera efectiva se crearon tablas y gráficos comparativos de producción por provincias, analizando la segmentación del uso de la producción láctea. Se realizaron así mismo análisis detallados de los resultados y se discutieron los aspectos relevantes en relación con la producción de lactosuero en Ecuador y las tecnologías de procesamiento disponibles.

Se destacó la importancia de encontrar aplicaciones sostenibles para el lactosuero, incluyendo su aprovechamiento en la fabricación de bioplásticos, bioproductos, biocombustibles y otros productos beneficiosos tanto para la industria alimentaria como para el medio ambiente. Al concluir la revisión bibliográfica, se estimó el potencial de aprovechamiento del lactosuero y sus posibles usos, contribuyendo así a fortalecer la seguridad agroalimentaria de la población local con criterios de sostenibilidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este artículo se basa en un análisis exhaustivo de noventa fuentes bibliográficas sobre el aprovechamiento de la proteína del lactosuero. De estas fuentes, el 97% corresponden a estudios publicados en los últimos seis años, desde 2018 hasta 2023, mientras que el 3% restante pertenece a publicaciones anteriores a este período, como se detalla en la Figura N° 1.

Como se evidencia en la figura anterior, se registró un incremento en el número de investigaciones respecto al aprovechamiento de la proteína del lactosuero, a excepción del año en declaró la pandemia de la COVID-19, la cual generó una grave contracción en todas las aristas de la sociedad y la investigación científica no fue un caso atípico. Durante el análisis bibliométrico se seleccionó un 83% de documentos que habían sido extraídos de la base de datos Scopus –por su amplia cantidad

de información e influencia en la comunidad científica–, mientras que un 6% de documentos eran provenientes de revista indexadas en Latindex y el 11% restante fue completado con otras fuentes de información y/o adicionales.

3.1. LACTOSUERO Y SU COMPOSICIÓN

El lactosuero es un líquido remanente de la producción de quesos y otros productos lácteos, color amarillo pálido a verde claro con sabor y aroma ligeramente ácido (Lappa *et al.*, 2019). Su composición varía según el tipo de queso, el proceso de fabricación y otros factores propios de cada planta de procesamiento (Kandasamy *et al.*, 2021). En términos de contenido, el lactosuero contiene varias proteínas de suero, como α -lactoglobulina (α -Lg), α -lactoalbúmina (α -La), inmunoglobulinas (Igs), albúmina sérica bovina (BSA) y otras fracciones menores, como lactoferrina (LF) y lactoperoxidasa (LP) (Gaudio, Curcio & Chakraborty, 2023; Muuronen, Partanen, Heidebrecht & Kulozik, 2021). Estas proteínas son de alto valor biológico debido a sus aminoácidos esenciales y digestibilidad (Khan *et al.*, 2019). Además de las proteínas, el lactosuero contiene lactosa – un carbohidrato presente en la leche–, así también presenta minerales esenciales como calcio, fósforo, potasio y magnesio (Ning, Cao, Yue & Yan, 2023).

También puede contener compuestos bioactivos, como péptidos y factores de crecimiento, que tienen propiedades beneficiosas para la salud (Wu *et al.*, 2021). A pesar de ser considerado un desecho, en la actualidad se reconoce el valor del lactosuero como fuente valiosa de nutrientes y compuestos funcionales (Asas, Llanos, Matavaca & Verdezoto, 2021). Su obtención a gran escala buscando optimización de costos ha impulsado la investigación para aprovecharlo, por lo que comprender sus propiedades es esencial para explorar su potencial en diversas aplicaciones industriales y alimentarias.

3.2. PROPIEDADES Y FUNCIONALIDAD DE LA PROTEÍNA DEL LACTOSUERO

La proteína del lactosuero presenta una amplia variedad de propiedades y beneficios en

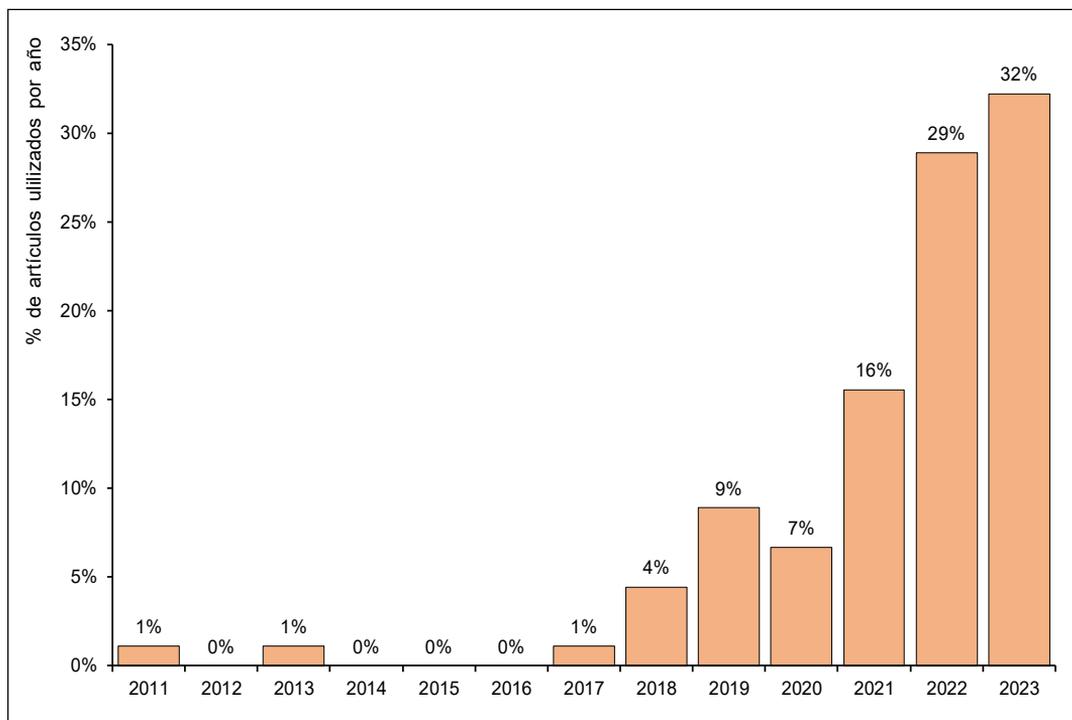


Figura 1. Artículos sobre el aprovechamiento de la proteína del lactosuero por año

diferentes aplicaciones, que a continuación se describen: unas de ellas es el valor nutricional destacado por tener proteína altamente nutritiva debido a su contenido de aminoácidos esenciales, fundamentales para el desarrollo y mantenimiento de tejidos en el cuerpo humano (Marx & Kulozik, 2018). Por otra parte, se resalta la facilidad de digestión de la proteína del lactosuero de manera eficiente. Esto la convierte en una excelente fuente de proteínas para personas con necesidades específicas, como atletas, adultos mayores o aquellos en proceso de recuperación de enfermedades o lesiones (Hebishy, Joubran, Murphy & O'Mahony, 2019).

Por su valor nutricional, la proteína del lactosuero desempeña un papel funcional en aplicaciones alimentarias (Daniloski *et al.*, 2021), en donde puede actuar como agente espumante, estabilizante, emulsionante y gelificante (Jiang *et al.*, 2019), para productos como batidos, helados, barras energéticas y productos de panadería (Sirmacekic *et al.*, 2022). Sin embargo, es muy importante considerar factores como la concentración de

proteína, el pH, la temperatura y la presencia de otros ingredientes para lograr los mejores resultados en cada caso (Calva-Estrada, Jiménez-Fernández, Vallejo-Cardona, Castillo-Herrera & Lugo-Cervantes, 2021), debido a que puede mejorar el sabor y la textura de ciertos alimentos.

Adicional a ello, se utiliza en la formulación de productos para aumentar el contenido proteico y mejorar la consistencia, suavidad y cremosidad de productos lácteos, postres y alimentos procesados (Mora, Patiño, Muñoz & Vallejo, 2022). Asimismo, sirve como promoción de la saciedad después de las comidas, lo que puede ser beneficioso para controlar el peso y regular el apetito, reduciendo el consumo excesivo de alimentos (Giglio, Lobo & Pimentel, 2023). Sin dejar de lado el aporte de algunas proteínas presentes como la lactoferrina y ciertos péptidos bioactivos, que poseen propiedades antioxidantes y beneficiosas para la salud (Buey, Layunta, Latorre & Mesonero, 2023). Cabe destacar que estos compuestos pueden tener efectos antiinflamatorios, antimicrobianos,

inmunomoduladores y favorecer la salud intestinal (Koirala *et al.*, 2023).

3.3. USOS MÁS COMUNES

Se prevé que la población mundial alcance unos 9.500 millones en 2050, lo que significa que se necesitarán «casi tres planetas» para proporcionar recursos naturales que permitan mantener los actuales estilos de vida (Contreras, Romero-García, López-Linares, Romero & Castro, 2022). Por tal motivo, es muy importante el uso de los residuos mediante un proceso de simbiosis, lo que también está alineado con lo mencionado por Caldeira *et al.* (2020) describiendo que Las Naciones Unidas han adoptado una meta específica en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita en el comercio minorista y los consumidores, contribuyendo a reducir las pérdidas de productos alimenticios para 2030.

Por lo mencionado anteriormente, el uso del suero de queso es considerado un subproducto de bajo costo en la industria láctea con potencial uso para la industria alimentaria. Esto es debido a que mundialmente se generan aproximadamente $1,8-1,9 \cdot 10^8$ toneladas al año (Zolfaghari, Hashemi, Karimi & Sadeghi, 2022), lo que abre el camino para implementación de áreas de negocios que producen residuos y aguas residuales potencialmente adecuados para el uso en las biorrefinerías (Escalante, Castro, Amaya, Jaimes & Jaimes-Estévez, 2018). Es importante describir que el sector lácteo desempeña un papel significativo en la economía de la Unión Europea (UE) y muchas empresas lácteas están haciendo enormes esfuerzos para cumplir con las medidas de protección hacia el medio ambiente y la biodiversidad. La producción de leche en la UE durante el 2017 asciende a 170 millones de kg y las industrias lácteas generan una media de 2,5 l de aguas residuales por cada l de leche procesada, así como unos 9-10 l de suero de queso por kg de queso producido, lo que supone unos 400.000 billones de litros de aguas residuales al año (Asunis *et al.*, 2020). Por consiguiente, el suero es un subproducto con alta posibilidad de aprovechamiento en la industria láctea, el cual comprende aproximadamente el 20% de las

proteínas, el 70% de la lactosa, el 45-50% de los sólidos totales y casi la totalidad de las vitaminas hidrosolubles de la leche (Hashemi, Karimi & Taherzadeh, 2022), convirtiéndolo en un medio de crecimiento asequible para el cultivo de hongos y la producción de biomasa, que posteriormente deben ser tratado por consideraciones medioambientales (Zolfaghari *et al.*, 2022).

Por otra parte, Jeong (2022) menciona que el lactosuero se ha valorizado mediante enfoques biotecnológicos para producir una serie de productos valiosos, como alimentos, bioplásticos, biofertilizantes, biocombustibles, ácidos orgánicos, péptidos bioactivos, enzimas, biosurfactantes, proteínas unicelulares y polisacáridos. En particular, se ha explorado el uso del lactosuero como materia prima para la producción de combustibles y productos químicos, como bioetanol, biobutanol, biometano, biodiésel, ácido cítrico, ácido succínico, ácido propiónico y ácido láctico (Arshad *et al.*, 2023). Sin dejar de lado los usos descritos por Polanowska (2023) tales como ácido láctico, polihidroxialcanoatos, bacteriocinas exopolisacáridos, nutracéuticos, aromas y edulcorantes con aplicaciones en las industrias del envasado, farmacéutica, cosmética y médica.

A pesar de su amplio espectro de uso, es importante abordar las ventajas y desventajas, riesgos, condiciones y regulaciones asociadas con cada aplicación del lactosuero. Por ejemplo, aunque las proteínas lácteas son gelificantes ideales y se utilizan en aplicaciones como aditivos alimentarios y estabilizadores de moléculas bioactivas (Guo *et al.*, 2023; Momen, Rodrigue & Aider, 2023), la implementación de estos usos puede requerir cumplir con normativas específicas de calidad y seguridad. Las proteínas del suero también son prometedoras como fuente de carotenoides, ácidos grasos, vitaminas, resveratrol, curcumina y otros compuestos bioactivos (Rasera, De María & Tavares, 2023), y su uso en la producción de bebidas fermentadas representa una solución rentable para el desarrollo de productos de valor añadido (Ayed, M'hir & Asses, 2023). Sin embargo, se deben considerar las condiciones de proceso y regulaciones para

asegurar la viabilidad económica y ambiental de estas aplicaciones (Giglio *et al.*, 2023).

3.4. GENERACIÓN DE LACTOSUERO EN EL ECUADOR

Los sectores de agricultura, ganadería, silvicultura y pesca (AGSP) han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo del Ecuador, como se puede apreciar en la Figura N° 2. Desde el año 2014 hasta el 2020 estos sectores han tenido una contribución más o menos constante para el Producto Interno Bruto (PIB) del país, oscilando entre 9,4 y 9,8 millones de US dólares anuales. Esto ha posicionado a este sector como uno de los grandes pilares de la economía, contribuyendo al PIB entre el 8,6% al 9,8% desde el año 2010 hasta la fecha actual, conforme datos del Banco Central del Ecuador (BCE, 2023a, 2023b).

Según el Informe del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) y la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) del año 2021, la producción diaria de leche a nivel nacional alcanzó un total de 5.699.046 litros. De este volumen, el 79,6% correspondió a la región sierra, con 4.535.235 litros; le seguían la región costa, con 933.330 litros (16,4%) y finalmente, la región amazónica con 230.481 litros (4%).

Si se observa la distribución de la producción a nivel provincial, la Figura N° 3 muestra que las provincias con mayor producción de leche son las siguientes: en primer lugar se ubica Pichincha, con el 18% de la producción nacional; le siguen Azuay (13,6%), Manabí (10,8%) y Cotopaxi (10,5%), todas ellas desempeñando un papel significativo en la producción lechera. El 47,1% de la producción restante se distribuye entre las otras 20 provincias del país.

Con base en el informe de la Superintendencia de Control del Poder del Mercado (SCPM) del año 2021, la producción láctea en Ecuador ha mantenido un nivel constante superior a los cinco millones de litros (5 MMI) desde el año 2010, como se representa en la Figura N° 4. Adicionalmente, de acuerdo con una investigación realizada por Hashemi *et al.* (2022), aproximadamente el 31% de la producción total de leche se destina a la elaboración de queso. A partir de esta

producción de queso se obtiene alrededor del 20% de proteína del lactosuero, estimándose entre 0,31 MMI y 0,41 MMI de residuos de proteína de lactosuero, con graves impactos negativos hacia el ambiente. Un ejemplo de estos es el vertimiento del lactosuero en fuentes hídricas (Asas *et al.*, 2021), lo cual genera disminución de niveles de oxígeno en el agua, debido a la acción microbiana que transforma la materia orgánica en compuestos que reducen el pH y como consecuencia se producen malos olores y la muerte de los organismos acuáticos. Sumado a esto el lactosuero es una fuente importante de contaminación ambiental por su alto contenido de materia orgánica, con una demanda biológica de oxígeno (DBO) que varía entre 30.000 y 50.000 mg/l y una demanda química de oxígeno (DQO) que oscila entre 60.000 y 80.000 mg/l. Por último, el 90% de esta carga proviene del contenido de lactosa, que tiene un tipo de enlace en sus azúcares que impide que muchos microorganismos la degraden (Muñoz, 2019).

Para contrarrestar esta problemática que acarrea a la sociedad existen alternativas que podrían mitigar los efectos para este sector productivo.

3.5. TECNOLOGÍAS DE PROCESAMIENTO DE LACTOSUERO

El aumento de la demanda de energía en las fuentes tradicionales para satisfacer las necesidades humanas ha llevado a explorar todas las técnicas viables de captación de energía de diversas fuentes (Sirmacekic *et al.*, 2022). La eliminación y liberación de estos residuos no tratados en el medio ambiente dará lugar a la deposición de contaminantes en el ecosistema, que finalmente afectará a los seres humanos y otros seres vivos (Yaashikaa, Senthil & Varjani, 2022). De allí que uno de los medios destinados al aprovechamiento más utilizado en las últimas décadas sean las biorrefinerías, basadas en el principio de la economía circular (EC). Este es un concepto que pretende «cerrar el círculo» utilizando todos los recursos, minimizando los residuos y, lo que es más importante, valorizarlo (Culaba *et al.*, 2022). Por otra parte, debido a la cantidad de residuos que puede causar diversos problemas ambientales, es urgente realizar un manejo

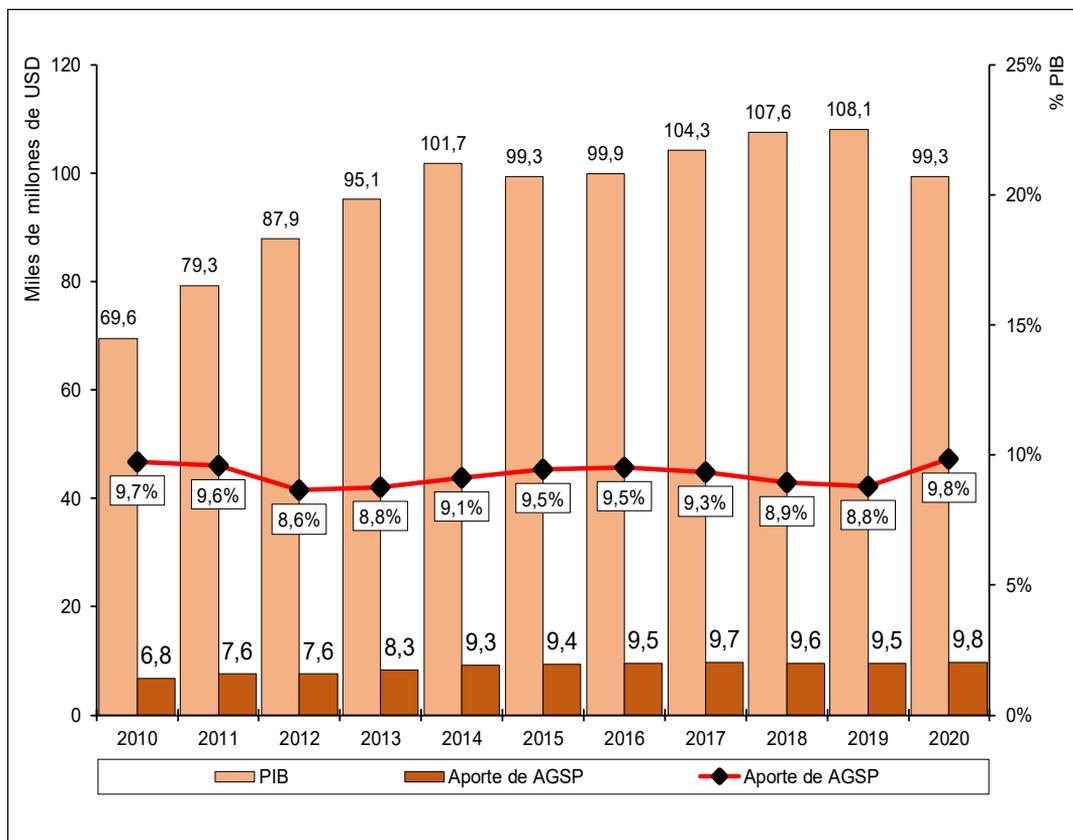


Figura 2. Aporte de la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca (AGSP) al PIB del Ecuador

adecuado y uno de los métodos potenciales para tratar los residuos es mediante el proceso de digestión anaerobia (DA), el cual puede tratar una gran variedad de residuos orgánicos (Millati, Wikandari, Ariyanto, Hasniah & Taherzadeh, 2023).

Por lo tanto, es interesante explorar enfoques innovadores para la gestión de residuos lácteos, capaces de evitar problemas medioambientales o proporcionar energía renovable, limpia, así como bioproductos innovadores que pueden reforzar la cadena de suministro lácteo (Asunis *et al.*, 2022). Con base a lo anteriormente descrito, Mabrouki *et al.* (2022) construyeron un modelo de biorrefinería rentable para la valorización del suero de queso tunecino, en donde el modelo pretende estimar el rendimiento del etanol, el impacto medioambiental en términos de emisiones de

dióxido de carbono y realizar un análisis económico aplicando diferentes escenarios optimizados. La aplicación de la modelización y las simulaciones mejoran la comprensión del proceso proporcionando una herramienta válida para comparar los resultados. En el caso que aquí ocupa, la simulación podría ayudar a una mayor producción de etanol, una que produzca menos emisiones presentes o tenga mejores indicadores económicos.

En este orden de ideas, Rossi, Pasciucco, Iannelli & Pecorini (2022) indican que estos compuestos pueden ser ácidos grasos volátiles (AGV), que son precursores de biopolímeros, es decir, polihidroxialcanoatos (PHA), debido a que los PHA tienen características físico-químicas y mecánicas similares a los polímeros de origen fósil –es decir, polietileno (PE), polipropileno, (PP), poliestireno (PS)–. No

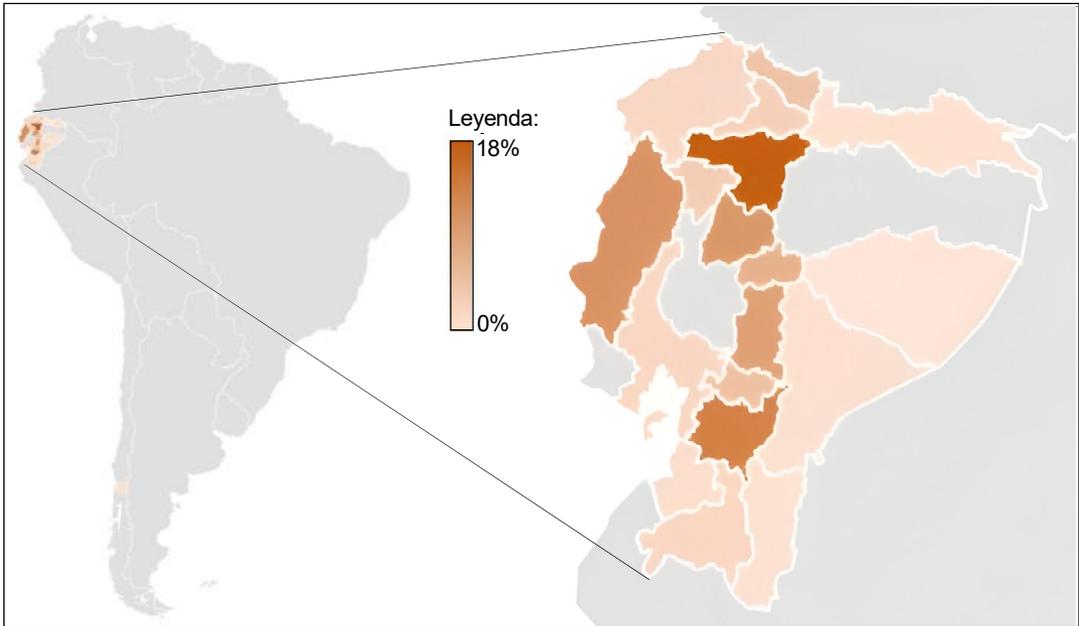


Figura 3. Participación de la producción de leche por provincia en Ecuador

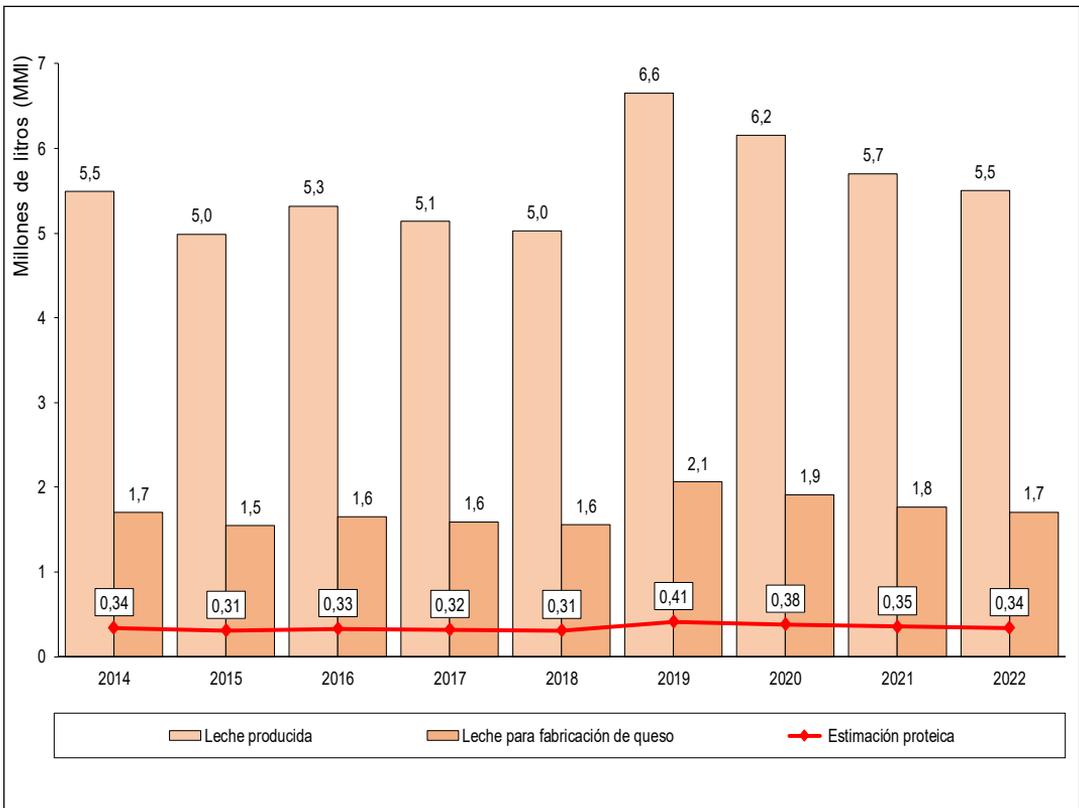


Figura 4. Estimación proteínica de lactosuero

obstante, a diferencia de los compuestos fósiles mencionados, el PHAs es biodegradable. Abonado a lo descrito anteriormente, el interés por la bioeconomía también está creciendo por la preocupación de las sociedades por satisfacer la mayor demanda de alimentos y materiales producidos de forma más sostenible, con un número creciente de consumidores bien informados que están más inclinados a adquirir productos respetuosos con el medio ambiente (Gaffey *et al.*, 2023). Las biorrefinerías verdes permiten producir diversos biomateriales, ya que las materias primas de biomasa son ricas en una gran cantidad de compuestos que pueden extraerse o convertirse en productos finales (Leong & Chang, 2023).

Según, Talan, Pokhrel, Tyagi & Drogui (2022) los residuos industriales lácteos, el agua de mar y el salvado de arroz también se emplean como fuente barata de carbono para la producción de bioplásticos, utilizando bacteria gram positiva (cepa designada SRKP-3), que potencialmente acumula polihidroxicanoatos (PHA). Además, el enfoque de biorrefinería de residuos alimentarios para la producción de biopolímeros es también una vía sostenible para la producción de PHA. Adicionalmente, Hierro-Iglesias, Chiphango, Thornley & Fernández-Castané (2022) indican que los biopolímeros ofrecen muchas ventajas medioambientales frente a los plásticos derivados del petróleo. Por ejemplo, según estudios recientes la producción de un kg de PHA supone una reducción del 80% del potencial de calentamiento global en comparación con la alternativa petroquímica. Una de las áreas de los bioplásticos en las que cada vez se investiga más son las que se producen a partir de proteínas, como las proteínas de soja, guisantes y subproductos lácteos como la proteína de suero, que pueden obtenerse a partir del subproducto de los procesos de fabricación del queso (Qazanfarzadeh & Kumaravel, 2023).

La producción mundial de lactosuero se estima en unos 200 millones de toneladas al año, con una tasa de crecimiento del 2% anual. De ellas, 47% se desechan directamente por los desagües, lo que provoca problemas medioambientales (Chalermthai, Giwa, Schmidt & Taher, 2021). Aunque estas películas

exhiben una excelente permeabilidad al oxígeno (OP), poseen una inadecuada permeabilidad al vapor de agua (WVP) debido a su hidrofilia. Además, las películas de proteína de suero son quebradizas y deben plastificarse con glicerol (Schmid, 2013). En otras palabras, hay limitantes para el uso de las proteínas del lactosuero como materiales de envasado de alimentos (Jin, Yadav & Qi, 2023). Las proteínas del suero son una fuente de oligosacáridos que pueden utilizarse en la industria alimentaria y mediante fermentación pueden producir una concentración máxima de 11,32 g/L de biopolímeros de polihidroxicanoatos (Wasewar, 2023).

Por otro lado, Verma *et al.* (2023) en su investigación consideran la importancia nutricional del suero de *paneer* y el problema para la eliminación, evaluando la producción de ácido láctico por *P. pentosaceus* en condiciones de fermentación aeróbica de lactosa de suero de *paneer* seguido de una disminución en el rango de pH con el aumento del crecimiento celular y la disminución de la concentración de lactosa. Otro estudio realizado por, Harwood & Drake (2022) indican que las proteínas presentes en la leche fluida o se utilizan para producir concentrados comerciales de proteínas del suero (34%-80% de proteína) o aislados (WPI; >90% de proteína). Entre los combustibles producidos bioquímicamente a partir del lactosuero destacan el bioetanol (bioET), el biohidrógeno (bioH₂), el biobutanol (bioBut) y el biometano (bioMET) (Awasthi *et al.*, 2022; Stamatelatos, Antonopoulou, Tremouli & Lyberatos, 2011). La producción de bioMET a partir de la digestión anaerobia (DA) es viable. Sin embargo, presenta ciertos inconvenientes, como la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) que provocan la acidificación y la inhibición de la actividad metanogénica, lo que afecta al rendimiento de metano y la estabilidad del proceso (Conde & Cond, 2022).

3.6. LIMITANTES Y OPORTUNIDADES PARA USO A NIVEL INDUSTRIAL

A pesar de los diversos usos del lactosuero a nivel industrial, existen algunas limitaciones y desafíos asociados con su uso. Entre ellos se incluyen factores como que el volumen de la

producción de lactosuero, que a nivel industrial puede generar gran cantidad de subproducto, lo que a su vez plantea desafíos logísticos, almacenamiento, transporte; adicionalmente el procesamiento eficiente del lactosuero requiere instalaciones y equipos adecuados (Rocha & Guerra, 2020). A pesar de los múltiples usos del lactosuero, su valor comercial puede ser variable y dependerá de factores como la demanda del mercado, los costos de procesamiento y el valor nutricional específico del producto derivado del lactosuero. Esto puede influir en la rentabilidad y en la viabilidad económica de su uso industrial (Buchanan, Martindale, Romeih & Hebishy, 2023).

Es importante tener en cuenta que muchas de estas limitaciones pueden ser abordadas mediante la implementación de buenas prácticas de producción, tecnologías de procesamiento adecuadas y enfoques sostenibles (Kazimierowicz, Zielinski, Bartkowska & Dêbowski, 2022). La investigación y el desarrollo continuo también pueden contribuir a superar estos desafíos y a encontrar nuevas oportunidades para el lactosuero en la industria (Kadian, Dularia & Chander, 2023).

El descubrimiento de nuevas aplicaciones alimentarias para el lactosuero ha expandido su mercado, abriendo oportunidades en diversos sectores y consolidándose como un recurso valioso, lo que implica ingresos para las empresas involucradas en su producción y comercialización (Bintsis & Papademas, 2023; Borghesi, Stefanini & Vignali, 2022). Además, el aprovechamiento de la proteína del lactosuero también ha permitido la diferenciación de suplementos nutricionales, que utilizan este ingrediente como componente principal (Zhao, Chen & Ashaolu, 2022; Schaefer, Etges & Schaefer, 2023). Esta ampliación de la oferta en el mercado satisface las necesidades y preferencias de los consumidores, lo cual puede ser beneficioso desde un punto de vista económico (Cochachin-Carrera, Moreno-Cuevas & Carvajal-Mena, 2023). Cabe mencionar que, si no se gestiona adecuadamente, el lactosuero puede convertirse en una carga ambiental debido a su alto contenido de nutrientes y materia orgánica (Buchanan *et al.*, 2023), por lo cual deben ser

tratados para minimizar el impacto ambiental. De ser tratados se pueden mitigar efectos adversos de los residuos industriales en la agricultura, deteriorando el medio ambiente para lo cual existen tratamientos físicos y biológicos (Ahmad *et al.*, 2019).

De manera complementaria, el aprovechamiento de la proteína del lactosuero contribuye a la reducción de residuos generados por la industria láctea (Ozel *et al.*, 2022), debido a que el lactosuero se consideraba un desecho y se descarta, con su consecuente impacto negativo en el medio ambiente. Sin embargo, al utilizar y convertir este subproducto en un ingrediente valioso, se minimiza el desperdicio y se optimiza el uso de los recursos (Barba, 2021; Valdez *et al.*, 2020).

Además, la producción de proteína del lactosuero tiene menor huella de carbono en comparación con otras fuentes de proteínas, como la carne (Behm *et al.*, 2022; Peydayesh, Bagnani, Soon & Mezzenga, 2023), porque la producción de carne requiere grandes cantidades de recursos naturales y genera emisiones significativas de gases de efecto invernadero (Shabir *et al.*, 2023). Esto constituye una gran diferencia si se compara con el uso de la proteína del lactosuero como alternativa, la cual puede reducir el impacto ambiental asociado con la producción de proteínas (Arciello *et al.*, 2021).

Finalmente, el aprovechamiento de la proteína del lactosuero ejemplifica la valorización de subproductos de la industria alimentaria. En lugar de desecharlo, se le otorga un nuevo propósito y se le agrega valor, lo que reduce la necesidad de extraer nuevos recursos contribuyendo a una economía más sostenible y robusta.

5. CONCLUSIÓN

La revisión bibliográfica presentada en este artículo señala un creciente interés en las investigaciones relacionadas con el aprovechamiento del lactosuero, con un marcado aumento en el número de estudios a partir del año 2021. Estas investigaciones se han enfocado en explorar diversas tecnologías y procesos para convertir el lactosuero en productos de valor, que

abarcan una amplia gama que va desde alimentos hasta los bioplásticos y biocombustibles. Además, se ha subrayado la importancia de abordar el problema ambiental asociado con la inadecuada eliminación del lactosuero en cuerpos de agua y suelos.

En Ecuador la expansión de la industria láctea –que incluye la producción diaria de leche queso y lactosuero– juega un papel clave en la economía nacional, debido a que este sector ha contribuido significativamente al Producto Interno Bruto (PIB), aportando al menos el 8,6% anual entre 2010 a 2020. Este rol destaca de modo particular por su potencial de crecimiento e importancia en la cadena alimentaria, sin desmerecer sus potencialidades del lactosuero, dado su elevado contenido proteico y su versatilidad en aplicaciones como la alimentación animal, aditivos alimentarios y suplementos nutricionales, ofreciendo una fuente de proteína accesible al tiempo que se reduzcan los impactos negativos en el medio ambiente.

A pesar de que el lactosuero comúnmente se considera un subproducto desechable de la cadena de valor láctea, se reconoce su gran potencial para su aprovechamiento en diversas industrias como la alimentaria, la química, la cosmética y la biomédica. Esto incluye su aprovechamiento para la fabricación de bioplásticos, bioproductos, biocombustibles y otros productos diversos. Materializarlo se traduciría en ingentes beneficios tanto para la industria alimentaria como para ambiente, contribuyendo así al fomento de la economía circular y al desarrollo sostenible. No obstante, para aprovechar plenamente estos residuos es indispensable llevar a cabo investigaciones adicionales, junto con más inversiones, el fomento de la colaboración entre la industria y los gobiernos, superando de esta manera los desafíos asociados con su aprovechamiento. Este último aspecto es particularmente relevante en el caso de las provincias de mayor producción láctea, como Pichincha, Azuay, Manabí y Cotopaxi.

REFERENCIAS

- Ahmad, T., Aadil, R. M., Ahmed, H., Rahman, U. U., Soares, B. C. V., Souza, S. L. Q.,...Cruz, A. G. (2019). Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 361-372. <https://doi.org/10.1016/j.tfs.2019.04.003>
- Arciello, A., Panzella, L., Dell'Olmo, E., Abdalrazeq, M., Moccia, F., Gaglione, R.,...Giosafatto, C. V. L. (2021). Development and characterization of antimicrobial and antioxidant whey protein-based films functionalized with Pecan (*Carya illinoensis*) nut shell extract. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100710. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100710>
- Arpit Singh, T., Sharma, M., Sharma, M., Dutt Sharma, G., Kumar Passari, A., & Bhasin, S. (2022). Valorization of agro-industrial residues for production of commercial biorefinery products. *Fuel*, 322, 124284. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124284>
- Arshad, U. T., Hassan, A., Ahmad, T., Naeem, M., Chaudhary, M. T., Abbas, S. Q.,...Aadil, R. M. (2023). A recent glance on the valorisation of cheese whey for industrial prerogative: High-value-added products development and integrated reutilising strategies. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(4), 2001-2013. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16168>
- Asas, C., Llanos, C., Matavaca, J., & Verdezoto, D. (2021). Whey: Environmental impact, uses and applications via biotechnology mechanisms. *Agroindustrial Science*, 11(1), 105-116. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.01.13>
- Asunis, F., Carucci, A., De Gioannis, G., Farru, G., Muntoni, A., Poletini, A.,...Spiga, D. (2022). Combined biohydrogen and polyhydroxyalkanoates production from sheep cheese whey by a mixed microbial culture. *Journal of Environmental Management*, 322, 116149. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116149>

- Asunis, F., De Gioannis, G., Dessì, P., Isipato, M., Lens, P. N. L., Muntoni, A.,...Spiga, D. (2020). The dairy biorefinery: Integrating treatment processes for cheese whey valorisation. *Journal of Environmental Management*, 276, 111240. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111240>
- Awasthi, M. K., Paul, A., Kumar, V., Sar, T., Kumar, D., Sarsaiya, S., Liu, H., Zhang, Z., Binod, P., Sindhu, R., Kumar, V., & Taherzadeh, M. J. (2022). Recent trends and developments on integrated biochemical conversion processes for valorization of dairy waste to value-added bioproducts: A review. *Bioresource Technology*, 344(A), 126193. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126193>
- Ayed, L., M'hir, S., & Asses, N. (2023). Sustainable whey processing techniques: Innovations in derivative and beverage production. *Food Bioscience*, 53, 102642. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102642>
- BCE (Banco Central del Ecuador). (2023a). *Cuenta Estadísticas Sector Real—Cuentas Cantonales*. Quito, Ecuador: BCE. Recuperado de <https://www.bce.fin.ec/informacioneconomica/sector-real>
- BCE (Banco Central del Ecuador). (2023b). *Producto Interno Bruto*. Quito, Ecuador: BCE. Recuperado de https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Administracion/bi_menuCNAd_e_f.html
- Barba, F. J. (2021). An Integrated Approach for the Valorization of Cheese Whey. *Foods*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/foods10030564>
- Behm, K., Nappa, M., Aro, N., Welman, A., Ledgard, S., Suomalainen, M., & Hill, J. (2022). Comparison of carbon footprint and water scarcity footprint of milk protein produced by cellular agriculture and the dairy industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(8), 1017-1034. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02087-0>
- Bintsis, T., & Papademas, P. (2023). Sustainable approaches in whey cheese production: A review. *Dairy*, 4(2), 249-270. <https://doi.org/10.3390/dairy4020018>
- Borghesi, G., Stefanini, R., & Vignali, G. (2022). Life cycle assessment of packaged organic dairy product: A comparison of different methods for the environmental assessment of alternative scenarios. *Journal of Food Engineering*, 318, 110902. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110902>
- Buchanan, D., Martindale, W., Romeih, E., & Hebishy, E. (2023). Recent advances in whey processing and valorisation: Technological and environmental perspectives. *International Journal of Dairy Technology*, 76(2), 291-312. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12935>
- Buey, B., Layunta, E., Latorre, E., & Mesonero, J. E. (2023). Potential role of milk bioactive peptides on the serotonergic system and the gut-brain axis. *International Dairy Journal*, 137, 105534. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105534>
- Caldeira, C., Vlysidis, A., Fiore, G., De Laurentiis, V., Vignali, G., & Sala, S. (2020). Sustainability of food waste biorefinery: A review on valorisation pathways, techno-economic constraints, and environmental assessment. *Bioresource Technology*, 312, 123575. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123575>
- Calva-Estrada, S. de J., Jiménez-Fernández, M., Vallejo-Cardona, A. A., Castillo-Herrera, G. A., & Lugo-Cervantes, E. del C. (2021). Cocoa nanoparticles to improve the physicochemical and functional properties of whey protein-based films to extend the shelf life of muffins. *Foods*, 10(11), 2672. <https://doi.org/10.3390/foods10112672>
- Chalermthai, B., Giwa, A., Schmidt, J. E., & Taher, H. (2021). Life cycle assessment of bioplastic production from whey protein obtained from dairy residues. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100695. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100695>
- Cochachin-Carrera, B., Moreno-Cuevas, J., & Carvajal-Mena, N. (2023). Effects of concentration by block freezing and vacuum evaporation on the physicochemical properties and digestibility of whey. *CyTA - Journal of Food*, 21(1), 313-320. <https://doi.org/10.1080/19476337.2023.2196321>

- Conde Mejía, C., & Conde Báez, L. (2022). Biorefinery, an integrated concept: Analysis of bioethanol and aromas production from whey. En F. I. Gómez Castro & C. Gutiérrez-Antonio (Eds.), *Biofuels and biorefining* (pp. 447-471). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824116-5.00007-6>
- Contreras, M. D. M., Romero-García, J. M., López-Linares, J. C., Romero, I., & Castro, E. (2022). Residues from grapevine and wine production as feedstock for a biorefinery. *Food and Bioprocess Technology*, *13*(4), 56-79. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.05.005>
- Cossio Colque, Y., & Chipana Mendoza, G. J. (2022). Aprovechamiento industrial del suero lácteo. *CIPyCOS*, *1*(2), 40-45. Recuperado de <https://cipycos.umsa.bo/index.php/1/article/view/15>
- Culaba, A. B., Mayol, A. P., San Juan, J. L. G., Vinoya, C. L., Concepcion, R. S., Bandala, A. A., ... Chang, J. S. (2022). Smart sustainable biorefineries for lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, *344*, 126215. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126215>
- Daniloski, D., Petkoska, A. T., Lee, N. A., Bekhit, A. E. D., Carne, A., Vaskoska, R., & Vasiljevic, T. (2021). Active edible packaging based on milk proteins: A route to carry and deliver nutraceuticals. *Trends in Food Science & Technology*, *111*, 688-705. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.024>
- Escalante, H., Castro, L., Amaya, M. P., Jaimes, L., & Jaimes-Estévez, J. (2018). Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries. *Waste Management*, *71*, 711-718. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.026>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. Roma, Italia: FAO. Recuperado de <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2019). (17 de septiembre de 2019). *Comunicado oficial de la FAO respecto al suero de leche en Ecuador*. Roma, Italia: FAO. Recuperado de <https://www.fao.org/ecuador/noticias/detail-events/fr/c/1208560/>
- Fournaise, T., Burgain, J., Perroud-Thomassin, C., & Petit, J. (2021). Impact of the whey protein/casein ratio on the reconstitution and flow properties of spray-dried dairy protein powders. *Powder Technology*, *391*, 275-281. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.026>
- Gaffey, J., Rajauria, G., McMahon, H., Ravindran, R., Dominguez, C., Ambye-Jensen, ... Sanders, J. P. M. (2023). Green Biorefinery systems for the production of climate-smart sustainable products from grasses, legumes and green crop residues. *Biotechnology Advances*, *66*, 108168. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108168>
- Gaudio, M. T., Curcio, S., & Chakraborty, S. (2023). Design of an integrated membrane system to produce dairy by-product from waste processing. *International Journal of Food Science & Technology*, *58*(4), 2104-2114. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15986>
- Giglio, B. M., Lobo, P. C. B., & Pimentel, G. D. (2023). Effects of whey protein supplementation on adiposity, body weight, and glycemic parameters: A synthesis of evidence. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, *33*(2), 258-274. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2022.09.014>
- Guo, N., Ye, S., Zhou, G., Zhang, Y., Zhang, F., Xu, J., Pan, S., Zhu, G., & Wang, Z. (2023). Effect of ultrasound treatment on interactions of whey protein isolate with rutin. *Ultrasonics Sonochemistry*, *95*, 106387. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106387>
- Gómez Soto, J. A., & Sánchez Toro, Ó. J. (2019). Producción de galactooligosacáridos: Alternativa para el aprovechamiento del lactosuero. Una revisión. *Ingeniería y Desarrollo*, *37*(1), 129-157. <https://doi.org/10.14482/inde.37.1.637>
- Harwood, W. S., & Drake, M. A. (2022). Manufacture of milk and whey products: Impact of processing on sensory characteristics of milk and dairy products. En P. L. H. McSweeney & J. P. McNamara (Eds.), *Encyclopedia of dairy sciences* (pp. 103-117). (3a. ed.). Nueva York, EE.UU.: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00110-0>

- Hashemi, S. S., Karimi, K., & Taherzadeh, M. J. (2022). Valorization of vinasse and whey to protein and biogas through an environmental fungi-based biorefinery. *Journal of Environmental Management*, *303*, 114138. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114138>
- Hebishy, E., Joubran, Y., Murphy, E., & O'Mahony, J. A. (2019). Influence of calcium-binding salts on heat stability and fouling of whey protein isolate dispersions. *International Dairy Journal*, *91*, 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.12.003>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (pp. 310-386). (4a. ed.). Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana.
- Hierro-Iglesias, C., Chimpango, A., Thornley, P., & Fernández-Castané, A. (2022). Opportunities for the development of cassava waste biorefineries for the production of polyhydroxyalkanoates in Sub-Saharan Africa. *Biomass and Bioenergy*, *166*, 106600. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106600>
- INEC-ESPAC (Instituto Nacional de Estadística y Censos y Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua). (2021). *Producción diaria y destino de la leche por región y provincia*. Quito, Ecuador: INEC. Recuperado de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-produccion-agropecuaria-continua/>
- INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). (2023). *El aprovechamiento del lactosuero en Argentina* (pp. 1-34). Buenos Aires, Argentina: INTA. Recuperado de https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/economia-industrial/02-2023/lactosuero_argentina_final_v2.pdf
- Jeong, G. T. (2022). Valorization of dairy by-products: Optimized synthesis of 5-hydroxymethylfurfural and levulinic acid from lactose and whey. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(5), 108413. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108413>
- Jiang, Z., Wang, C., Li, T., Sun, D., Gao, H., Gao, Z., & Mu, Z. (2019). Effect of ultrasound on the structure and functional properties of transglutaminase-crosslinked whey protein isolate exposed to prior heat treatment. *International Dairy Journal*, *88*, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.08.007>
- Jin, T. Z., Yadav, M. P., & Qi, P. X. (2023). Antimicrobial and physiochemical properties of films and coatings prepared from bio-fiber gum and whey protein isolate conjugates. *Food Control*, *148*, 109666. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109666>
- Kadian, D., Dularia, C., & Chander, M. (2023). Potential aspects of whey proteins in dairy products: Chemistry, bio-functional characteristics, and their applications. En M. R. Goyal, S. Ranvir, & J. A. Malik (Eds.), *The chemistry of milk and milk products* (pp. 251-274). Florida, EE.UU.: Apple Academic Press.
- Kandasamy, S., Yoo, J., Yun, J., Kang, H. B., Seol, K. H., Kim, H. W., & Ham, J. S. (2021). Application of whey protein-based edible films and coatings in food industries: An updated overview. *Coatings*, *11*(9), 1056. <https://doi.org/10.3390/coatings11091056>
- Kazimierowicz, J., Zielinski, M., Bartkowska, I., & Dębowski, M. (2022). Effect of acid whey pretreatment using ultrasonic disintegration on the removal of organic compounds and anaerobic digestion efficiency. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(18), 11362. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811362>
- Khan, I. T., Nadeem, M., Imran, M., Ullah, R., Ajmal, M., & Jaspal, M. H. (2019). Antioxidant properties of Milk and dairy products: A comprehensive review of the current knowledge. *Lipids in Health and Disease*, *18*(1), 41. <https://doi.org/10.1186/s12944-019-0969-8>
- Koirala, P., Dahal, M., Rai, S., Dhakal, M., Nirmal, N. P., Maqsood, S., Al-Asmari, F., & Buranasompob, A. (2023). Dairy Milk Protein-Derived Bioactive Peptides: Avengers Against Metabolic Syndrome. *Current Nutrition Reports*, *12*(2), 308-326. <https://doi.org/10.1007/s13668-023-00472-1>
- Lappa, I. K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Terpou, A., Koulougliotis, D., Eriotou, E., & Kopsahelis, N. (2019). Cheese whey processing: Integrated biorefinery concepts and emerging food applications. *Foods*, *8*(8), 347. <https://doi.org/10.3390/foods8080347>

- Leong, Y. K., & Chang, J. S. (2023). Waste stream valorization-based low-carbon bioeconomy utilizing algae as a biorefinery platform. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113245>
- Mabrouki, J., Abbassi, M. A., Khiari, B., Jellali, S., Zorpas, A. A., & Jeguirim, M. (2022). The dairy biorefinery: Integrating treatment process for Tunisian cheese whey valorization. *Chemosphere*, 293, 133567. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133567>
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (12 de noviembre de 2020). «Ecuador se nutre de leche» y el sector lácteo se fortalece con apoyo del Gobierno Nacional - Ministerio de Agricultura y Ganadería. Quito, Ecuador: MAG. <https://www.agricultura.gob.ec/ecuador-se-nutre-de-leche-y-el-sector-lacteo-se-fortalece-con-apoyo-del-gobierno-nacional/>
- Marx, M., & Kulozik, U. (2018). Thermal denaturation kinetics of whey proteins in reverse osmosis and nanofiltration sweet whey concentrates. *International Dairy Journal*, 85, 270-279. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.04.009>
- Millati, R., Wikandari, R., Ariyanto, T., Hasniah, N., & Taherzadeh, M. J. (2023). Anaerobic digestion biorefinery for circular bioeconomy development. *Bioresour. Technology Reports*, 21, 101315. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101315>
- Momen, S., Rodrigue, D., & Aider, M. (2023). Fabrication and characterization of heat-set composite gels obtained from complexation of electro-activated whey/canola proteins mixture. *Food Hydrocolloids*, 141, 108751. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108751>
- Mora Cortez, J. X., Patiño Portilla, D. A., Muñoz Paredes, J. F., & Vallejo Castillo, V. E. (2022). Lactosuero: Materia prima para la elaboración de productos con valor agregado. *Boletín Informativo CEI*, 9(1), 103-106. Recuperado de <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/3017>
- Muñoz Murillo, J. P. (2019). *Reutilización del lactosuero y su efecto en la sostenibilidad ambiental de la Cooperativa de Producción Agropecuaria del Cantón Chone – Ecuador*. (Tesis de doctorado inédita). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Ecuador. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/323352649.pdf>
- Muuronen, K., Partanen, R., Heidebrecht, H. J., & Kulozik, U. (2021). Effects of conventional processing methods on whey proteins in production of native whey powder. *International Dairy Journal*, 116, 104959. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104959>
- Ning, J., Cao, X., Yue, X., & Yang, M. (2023). Quantitative phosphoproteome analysis reveals differential whey phosphoproteins of bovine milk during lactation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 234, 123681. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123681>
- Ozel, B., McClements, D. J., Arikan, C., Kaner, O., & Oztop, M. H. (2022). Challenges in dried whey powder production: Quality problems. *Food Research International*, 160, 111682. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111682>
- Oyarvide-Ramírez, H., Arce-Olivo, T., Loor-Reasco, W., & Quiñónez Monrroy, G. (2023). La soya en Ecuador: importancia y alternativas para su producción sustentable con rentabilidad económica. *Revista Agroalimentaria*, 28(55), 19-38. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.338819>
- Panghal, A., Patidar, R., Jaglan, S., Chhikara, N., Khatkar, S. K., Gat, Y., & Sindhu, N. (2018). Whey valorization: Current options and future scenario – A critical review. *Nutrition & Food Science*, 48(3), 520-535. <https://doi.org/10.1108/NFS-01-2018-0017>
- Pantoja, L. S. G., Amante, E. R., Rodrigues, M. da C., & da Silva, L. H. M. (2022). World scenario for the valorization of byproducts of buffalo milk production chain. *Journal of Cleaner Production*, 364, 132605. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132605>
- Peydayesh, M., Bagnani, M., Soon, W. L., & Mezzenga, R. (2023). Turning Food Protein Waste into Sustainable Technologies. *Chemical Reviews*, 123(5), 2112-2154. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00236>
- Polanowska, K. (2023). Lactic acid bacteria in biorefineries. En D. Montet, R. C. Ray, V. A. De Carvalho Azevedo, & S. Paramithiotis (Eds.), *Applied Biotechnology Reviews: Lactic Acid Bacteria as Cell Factories* (pp. 49-76). Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91930-2.00018-3>

- Qazanfarzadeh, Z., & Kumaravel, V. (2023). Hydrophobisation approaches of protein-based bioplastics. *Trends in Food Science & Technology*, 138, 27-43. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.06.002>
- Rasera, M. L., De Maria, A. L. A., & Tavares, G. M. (2023). Co-aggregation between whey proteins and carotenoids from yellow mombin (*Spondias mombin*): Impact of carotenoids' self-aggregation. *Food Research International*, 169, 112855. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112855>
- Rastogi, Y., Priya, & Gogate, P. R. (2022). Intensified recovery of whey proteins using combination of enzyme in free or immobilized form with ultrafiltration. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 179, 109076. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109076>
- Rocha, J. M., & Guerra, A. (2020). On the valorization of lactose and its derivatives from cheese whey as a dairy industry by-product: An overview. *European Food Research and Technology*, 246(11), 2161-2174. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03580-2>
- Rocha-Mendoza, D., Kosmerl, E., Krentz, A., Zhang, L., Badiger, S., Miyagusuku-Cruzado, G.,...García-Cano, I. (2021). Invited review: Acid whey trends and health benefits. *Journal of Dairy Science*, 104(2), 1262-1275. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19038>
- Rossi, E., Pasciucco, F., Iannelli, R., & Pecorini, I. (2022). Environmental impacts of dry anaerobic biorefineries in a Life Cycle Assessment (LCA) approach. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133692. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133692>
- Schaefer, J., Etges, B. I., & Schaefer, J. L. (2023). A literature database review of the competitive factors that influence the production and use of whey in the Brazilian dairy industry. *Foods*, 12(18), 3348. <https://doi.org/10.3390/foods12183348>
- Schmid, M. (2013). Properties of cast films made from different ratios of whey protein isolate, hydrolysed whey protein isolate, and glycerol. *Materials*, 6(8), 3254-3269. <https://doi.org/10.3390/ma6083254>
- SCPM (Superintendencia de Control del Poder del Mercado). (2021). *Estudio de mercado del sector lácteo* (Versión pública SCPM-IGT-INAC-002-2019). Quito, Ecuador: SCPM. Recuperado de https://www.sce.gob.ec/sitio/wp-content/uploads/2021/04/estudio_de_mercado_sector_lacteo_SCPM-IGT-INAC-002-2019.pdf
- Shabir, I., Dash, K. K., Dar, A. H., Pandey, V. K., Fayaz, U., Srivastava, S., & R, N. (2023). Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review. *Future Foods*, 7, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100215>
- Sirmacekic, E., Atilgan, A., Rolbiecki, R., Jagosz, B., Rolbiecki, S., Gokdogan, O., Niemiec, M., & Kocięcka, J. (2022). Possibilities of using whey wastes in agriculture: Case of Turkey. *Energies*, 15(24), 9636. <https://doi.org/10.3390/en15249636>
- Stamatelatos, K., Antonopoulou, G., Tremouli, A., & Lyberatos, G. (2011). Production of gaseous biofuels and electricity from cheese whey. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(2), 639-644. <https://doi.org/10.1021/ie1002262>
- Talan, A., Pokhrel, S., Tyagi, R. D., & Drogui, P. (2022). Biorefinery strategies for microbial bioplastics production: Sustainable pathway towards circular bioeconomy. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100875. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100875>
- Tedesco, R., Villoslada Hidalgo, M. del C., Vardè, M., Kehrwald, N. M., Barbante, C., & Cozzi, G. (2021). Trace and rare earth elements determination in milk whey from the Veneto region, Italy. *Food Control*, 121, 107595. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107595>
- Torres-Martínez, & Romero-León, K. (2020). Alternativas tecnológicas para uso del lactosuero: Valorización económica de residuos. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 30(55), 1-26. <https://doi.org/10.24836/es.v30i55.908>
- Valdez Castillo, M., Laxman Pachapur, V., Brar, S. K., Naghdi, M., Arriaga, S., & Avalos Ramirez, A. (2020). Yeast-driven whey biorefining to produce value-added aroma, flavor, and antioxidant compounds: Technologies, challenges, and alternatives. *Critical Reviews in Biotechnology*, 40(7), 930-950. <https://doi.org/10.1080/07388551.2020.1792407>

- Verma, S. K., Iram, D., Sansi, M. S., Pandey, K. K., Vij, S., & Sood, S. K. (2023). Sustainable utilization of dairy waste paneer whey by *Pediococcus pentosaceus* NCDC 273 for lactic acid production. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *47*, 102588. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102588>
- Wasewar, K. L. (2023). Chapter 31 - Sustainability of biorefineries for waste management. En P. Singh, P. Verma, R. Singh, A. Ahamad, & A. C. S. Batalhão (Eds.), *Waste Management and Resource Recycling in the Developing World* (pp. 721-754). Amsterdam, Países Bajos: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90463-6.00006-3>
- Wu, G., Hui, X., Gong, X., Tran, K. N., Stipkovits, L., Mohan, M. S., Brennan, M. A., & Brennan, C. S. (2021). Functionalization of bovine whey proteins by dietary phenolics from molecular-level fabrications and mixture-level combinations. *Trends in Food Science & Technology*, *110*, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.072>
- Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., & Varjani, S. (2022). Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review. *Bioresource Technology*, *343*, 126126. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126126>
- Zhao, C., Chen, N., & Ashaolu, T. J. (2022). Whey proteins and peptides in health-promoting functions – A review. *International Dairy Journal*, *126*, 105269. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105269>
- Zhao, Q., Li, K., Jiang, K., Yuan, Z., Xiao, M., Wei, G., Zheng, W., Wang, X., & Huang, A. (2023). Proteomic approach-based comparison of metabolic pathways and functional activities of whey proteins derived from Guishan and Saanen goat milk. *Journal of Dairy Science*, *106*(4), 2247-2260. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22404>
- Zolfaghari, S., Hashemi, S. S., Karimi, K., & Sadeghi, M. (2022). Valorization of cheese whey to eco-friendly food packaging and biomethane via a biorefinery. *Journal of Cleaner Production*, *366*, 132870. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132870>