

Artículo

Valorización del suero ácido por tecnologías de membranas para recuperar ácido láctico/lactato

The valorization of acid whey by membrane technologies was used to recover lactic acid/lactate

Ofelia Alexandra Granda Morocho ^{1,*}, Ana Lucia Guamán Guamán ², Luisa Gabriela González González ³, Mayra Isabel Calva Luzón ⁴ y Gabriela Alexandra Arciniega Alvarado ⁵

¹ Universidad Técnica de Machala, Ecuador, Machala; <https://orcid.org/0000-0001-8850-8180>

² Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador, Quevedo; <https://orcid.org/0009-0000-8730-6173>; aguamang4@uteq.edu.ec

³ Instituto Superior Tecnológico Loja, Ecuador, Loja; <https://orcid.org/0000-0001-7356-5262>; luisag37@gmail.com

⁴ Instituto Superior Tecnológico Loja, Ecuador, Loja; <https://orcid.org/0000-0003-3753-1246>; mayra_ic@yahoo.es

⁵ Instituto Superior Tecnológico Loja, Ecuador, Loja; <https://orcid.org/0000-0002-3064-4371>; gabrielarciniega86@hotmail.com

Cita: Granda Morocho, O. A., Guamán Guamán, A. L., González González, L. G., Calva Luzón, M. I., & Arciniega Alvarado, G. A. (2026). Valorización del suero ácido por tecnologías de membranas para recuperar ácido láctico/lactato. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 4(1), 60-73. <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n1/110>

Recibido: 06/12/2025
Revisado: 14/01/2026
Aceptado: 16/01/2026
Publicado: 18/01/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución- NoComercial 4.0 Internacional. \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

[\(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

* Correspondencia: ogranda@utmachala.edu.ec

 <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n1/110>

Resumen: La industria láctea genera grandes cantidades de suero ácido, un subproducto altamente contaminante por su alta carga orgánica, cuyo tratamiento inadecuado ocasiona problemas ambientales y pérdida de compuestos de alto valor, como ácido láctico/lactato. En ese sentido, el objetivo de este trabajo fue hacer una revisión de la eficiencia de las tecnologías de membranas en la valorización del suero ácido para recuperar ácido láctico/lactato e identificar las condiciones de operación y los factores que influyen en el proceso. Se realizó una revisión sistemática de la literatura (2020-2025) en Scopus, Web of Science y ScienceDirect utilizando una ecuación de búsqueda basada en “suero ácido”, “membranas”, “ácido láctico” y “recuperación”; se obtuvieron 215 registros, de los cuales se excluyeron 140 por título/resumen, se revisaron 75 a texto completo y se incluyeron 28 por criterios de relevancia y calidad metodológica. Los resultados indican que la nanofiltración tiene las mejores eficiencias de recuperación (>80% en condiciones optimizadas de presión, temperatura y pH), en tanto que la microfiltración y ultrafiltración son buenos pretratamientos para disminuir sólidos y proteínas, reduciendo el ensuciamiento y

mejorando las etapas posteriores. Además, la hibridación de procesos (por ejemplo, UF-NF-electrodialisis) mejora la eficiencia global y permite la desmineralización y purificación. Se concluye que las tecnologías de membranas, en especial en arreglos híbridos, son prometedoras para aprovechar el suero ácido a escala siguiendo principios de economía circular, pero la escalabilidad necesita estandarización de parámetros, control de ensuciamiento y análisis tecnoeconómicos y ambientales rigurosos.

Palabras clave: suero ácido; ácido láctico; lactato; tecnologías de membranas; nanofiltración.

Abstract: The dairy industry produces a lot of acid whey, which is a very polluting byproduct because it has a lot of organic matter in it. If it is not handled properly, it can cause environmental problems and lose valuable compounds like lactic acid/lactate. In this context, the aim of this study was to evaluate the efficacy of membrane technologies in the valorization of acid whey for the recovery of lactic acid/lactate and to ascertain the operating conditions and factors that affect the process. A systematic literature review (2020–2025) was performed in Scopus, Web of Science, and ScienceDirect utilizing a search equation incorporating “acid whey,” “membranes,” “lactic acid,” and “recovery”; 215 records were retrieved, from which 140 were excluded based on title/abstract, 75 were examined in full text, and 28 were selected according to relevance criteria and methodological quality. The results show that nanofiltration has the best recovery rates (>80% when pressure, temperature, and pH are all set to the right levels). Microfiltration and ultrafiltration, on the other hand, work well as pretreatments to get rid of solids and proteins, which helps prevent fouling and makes the next steps better. Process hybridization, such as UF-NF-electrodialysis, also makes the process more efficient and allows for demineralization and purification. It is concluded that membrane technologies, particularly in hybrid configurations, possess significant potential for the valorization of acid whey at scale, aligned with circular economy principles. However, scalability necessitates the standardization of parameters, control of fouling, and comprehensive techno-economic and environmental analyses.

Keywords: acid whey; lactic acid; lactate; membrane technologies; nanofiltration.

1. Introducción

Al generar derivados tales como yogures, quesos, entre otros, la industria láctea genera grandes cantidades de suero de leche como residuo. Aunque este suero contiene nutrientes valiosos como minerales, ácido láctico, proteínas y lactosa, ha sido considerado históricamente un desecho sin valor comercial (Colmenares et al. 2023). Se estima que, a nivel mundial, se producen aproximadamente 0.9 kg de suero por cada litro de leche procesada, lo que representa una considerable carga de desechos si no se gestiona adecuadamente (Onesti et al., 2025). Si no es tratado adecuadamente, el suero de leche es un gran contaminante, ya que posee una alta carga orgánica. Esto se debe a que la alta carga orgánica que posee causa serios problemas ambientales en los cuerpos de agua receptores. En este contexto, la industria láctea se ha interesado en aprovechar nuevamente el suero, pero por medio de procesos sustentables que lo conviertan en materias primas de valor agregado. (Kumar et al., 2023).

Cada año, este sector genera millones de toneladas de productos secundarios, siendo el suero ácido uno de los más abundantes y problemáticos, tanto por su volumen como por su carga orgánica (Brião et al., 2024). El inadecuado manejo de los residuos derivados de la producción de quesos y yogures representa un serio desafío ambiental y económico a nivel mundial, debido al alto potencial contaminante y los daños que puede causar en aguas y suelos (Pires et al., 2021).

El ácido láctico es un compuesto orgánico de gran utilidad en diversas industrias, entre ellas la alimentaria, farmacéutica, cosmética y de bioplásticos. Si bien la fermentación de carbohidratos es la principal vía para su obtención, el uso de suero lácteo como fuente para su producción ha cobrado relevancia por su bajo costo y abundancia (Naydenova et al. 2025), diversos estudios han demostrado que obtener ácido láctico a partir de suero lácteo no solo es económicamente viable, sino que también mejora la sostenibilidad del sector al reducir el desperdicio de este subproducto (Constanza, 2025).

Las tecnologías de membranas, como la ultrafiltración (UF) y la nanofiltración (NF), se han consolidado como alternativas eficientes para separar y concentrar componentes en soluciones complejas como el suero lácteo. Estas tecnologías destacan por operar a temperaturas moderadas y por su bajo consumo energético en comparación con otros métodos, además de permitir la recuperación de compuestos de alto valor añadido como el ácido láctico (Salatein et al. 2025b), mientras la UF separa partículas y macromoléculas, la NF, gracias a su menor tamaño de poro, permite la separación selectiva de moléculas pequeñas, como el ácido láctico (Talebi et al., 2021b).

En el marco de la economía circular y la bioeconomía, la valorización de subproductos es cada vez más relevante. El suero ácido, rico en lactosa, proteínas solubles, sales minerales y ácido láctico, representa una materia prima potencial para la obtención de productos de interés industrial (Onesti et al., 2025). En particular, el ácido láctico y su sal, el lactato, tienen aplicaciones en las industrias alimentaria, farmacéutica y de

biopolímeros, lo que impulsa el desarrollo de tecnologías para su recuperación (Kuo et al., 2025).

Durante la última década, las tecnologías de membranas han transformado la separación y purificación de compuestos en matrices complejas. Procesos como microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración permiten fraccionar el suero ácido y recuperar ácido láctico y lactosa con alta pureza y eficiencia energética (Hofmann & Hamel, 2023). Así, la aplicación de estas tecnologías contribuye a convertir un residuo en materia prima industrial, mejorando la eficiencia en el uso de recursos, disminuyendo el impacto ambiental y aumentando la competitividad del sector (Ostertag et al., 2023). No obstante, persisten desafíos, como la eficiencia de separación, el fouling y la viabilidad económica a escala industrial.

El problema científico que motiva esta revisión es la ineficiencia de los métodos tradicionales para recuperar ácido láctico/lactato del suero ácido y la necesidad de desarrollar procesos más sostenibles, eficientes y rentables para su aprovechamiento. La revisión bibliográfica se justifica por los beneficios potenciales de la revalorización integral del suero ácido, ya que reduce la contaminación ambiental y genera productos de alto valor añadido para la industria.

Por ello, el objetivo de este trabajo es revisar la eficiencia de las tecnologías de membranas aplicadas a la revalorización del suero ácido para la recuperación de ácido láctico/lactato, identificando las condiciones óptimas de operación y los factores que más influyen en el proceso, según la literatura científica. Como hipótesis, se plantea que la hibridación de tecnologías de membranas puede permitir la obtención de ácido láctico/lactato de alta pureza a partir de suero ácido de manera sustentable y a costos competitivos para la industria.

2. Materiales y Métodos

Esta revisión se llevó a cabo como una revisión sistemática de la literatura científica publicada entre 2020 y 2025 sobre la valorización del suero ácido utilizando tecnologías de membranas para recuperar ácido láctico/lactato. La metodología que se utilizó fue la recopilación, análisis y síntesis de estudios pertinentes para reunir evidencia actualizada sobre el desarrollo, uso y efectividad de estas tecnologías (Soumati et al. 2025b).

Para ello, se planteó una ecuación de búsqueda estructurada en bases de datos académicas de renombre (Scopus, Web of Science, ScienceDirect) empleando términos clave como "suero ácido", "membranas", "ácido láctico" y "recuperación". Se definieron criterios de inclusión y exclusión para asegurar la relevancia y calidad de los artículos seleccionados, dando prioridad a aquellos que incluyeran resultados experimentales, nuevos desarrollos tecnológicos, estudios comparativos y estudios de caso en entornos industriales.

Luego, los artículos preseleccionados fueron analizados en términos de relevancia, metodología, resultados y contribución al estado del arte. Se hizo énfasis en los distintos tipos de tecnologías de membranas empleadas (microfiltración, ultrafiltración,

nanofiltración y ósmosis inversa), parámetros de operación, eficiencia de separación, pureza del ácido láctico/lactato recuperado y viabilidad económica y ambiental de los procesos.

Finalmente, la información recolectada permitió reconocer tendencias, problemas y oportunidades en la revalorización del suero ácido y plantear recomendaciones para futuras investigaciones y aplicaciones industriales. Este abordaje metodológico garantiza una perspectiva completa y actualizada, permitiendo conocer el potencial y las limitaciones de las tecnologías de membrana en la recuperación de compuestos de alto valor a partir de subproductos lácteos.

2.1. Diseño y tipo de investigación

La investigación utilizó un diseño documental, descriptivo, retrospectivo y analítico. Se siguió una metodología de revisión sistemática, con los pasos estandarizados para asegurar la transparencia y reproducibilidad en la selección y análisis de las fuentes. Para ello, se realizó una búsqueda exhaustiva de información en bases de datos académicas, libros especializados, artículos científicos y documentos oficiales relacionados con el objeto de estudio. A continuación, se aplicaron criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos para seleccionar las fuentes que mejor contribuyeran al rigor y la relevancia del análisis.

La revisión sistemática incluyó la identificación, evaluación crítica y síntesis de la mejor evidencia disponible para dar una respuesta informada y actualizada a la pregunta de interés. Además, se documentaron los procedimientos precisos que se siguieron para la recolección y el procesamiento de los datos documentales, lo que permite replicar el estudio en futuras investigaciones. De esta manera, el diseño metodológico utilizado garantizó la validez y confiabilidad de los resultados, fortaleciendo el conocimiento científico en el área de estudio.

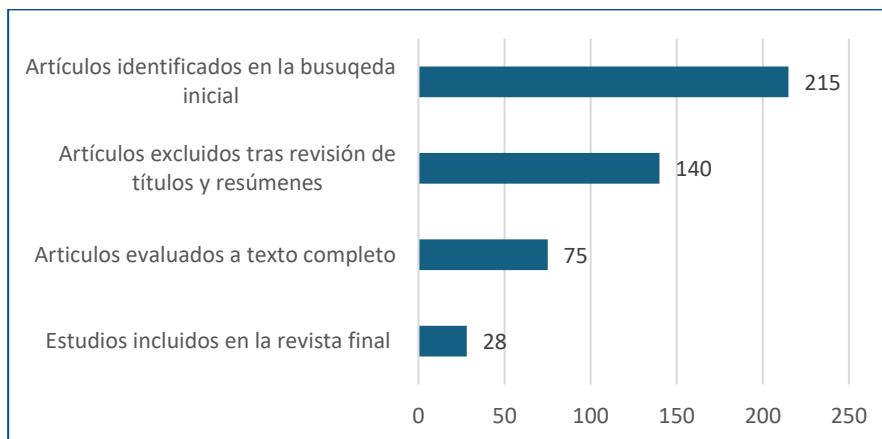
2.2. Estrategia de búsqueda y selección

Se consultaron bases de datos académicas de renombre, utilizando palabras clave en inglés y español como suero ácido, recuperación de ácido láctico/lactato y tecnologías de membranas. La búsqueda cubrió artículos originales, revisiones e informes técnicos publicados entre 2020 y 2025. Los criterios de inclusión fueron estudios que abordaran la separación, recuperación o purificación de ácido láctico/lactato a partir de suero ácido utilizando tecnologías de membranas. Se excluyeron estudios en otras matrices lácteas, tecnologías diferentes a membranas o sin texto completo disponible.

Se identificaron 215 artículos; se excluyeron 140 por títulos y resúmenes; se revisaron 75 a texto completo y se incluyeron 28 por cumplir criterios de relevancia y calidad metodológica, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Número de artículos por etapa del proceso de selección



De los 215 artículos encontrados en la búsqueda inicial, 140 fueron excluidos tras la lectura de títulos y resúmenes por no ajustarse a los criterios de inclusión. A continuación, se revisaron en su totalidad 75 artículos, de los cuales solo 28 cumplieron con los criterios de relevancia y calidad metodológica. Esto demuestra un proceso estricto de selección, en el que solo una parte de los artículos iniciales se incluye en el análisis final, garantizando la relevancia y validez de la revisión.

2.3. Proceso de revisión y análisis

La elección de los estudios se llevó a cabo en dos fases: en una primera revisión de títulos y resúmenes para eliminar estudios irrelevantes y, posteriormente, se leyeron los textos completos de los artículos preseleccionados para verificar su relevancia y calidad metodológica. Se recopiló y tabuló la información de interés en tablas comparativas (tipo de membrana, condiciones de operación, eficiencia de recuperación, ventajas y desventajas encontradas).

3. Resultados

3.1. Eficiencia de tecnologías de membranas reportadas

La recuperación de ácido láctico/lactato fue variable en función del tipo de membrana, las condiciones de operación y el pretratamiento del suero ácido utilizado. Por ejemplo, la nanofiltración alcanzó eficiencias mayores al 90 % en condiciones óptimas de presión y temperatura (Onesti et al., 2025; Brião et al., 2024). La ultrafiltración, un método comúnmente usado como tratamiento previo, concentró la proteína y facilitó la posterior purificación del ácido láctico (Hofmann & Hamel, 2023). Por su parte, la microfiltración sirvió para remover sólidos y disminuir el ensuciamiento en las etapas posteriores (Simonič & Novak Pintarič, 2021).

Como se puede observar en la Tabla 1, el tipo de tecnología y las condiciones operacionales marcaron la diferencia en la eficiencia de recuperación obtenida.

Tabla 1

Eficiencia de recuperación de ácido láctico/lactato según la tecnología de membrana, condiciones de operación y pretratamiento del suero ácido.

Tecnología	Condiciones de operación	Pretratamiento	Eficiencia de recuperación (%)	Referencia
Nanofiltración	Óptima presión y temperatura	Ninguno/Estándar	> 90	Onesti et al., 2025; Brião et al., 2024
Ultrafiltración	Estándar	Concentración de proteína	Facilitó purificación (dato cualitativo)	Hofmann & Hamel, 2023
Microfiltración	Estándar	Remoción de sólidos	> 75	Simonič & Novak Pintarič, 2021
Nanofiltración	Óptima presión y temperatura	Ninguno/Estándar	> 90	Beaulieu et al., 2020
Pilot scale – UF + NF + ED	Varias combinaciones evaluadas en escala piloto.	Ultrafiltración (UF) para proteínas + Nanofiltración (NF)	Reducción de ácido láctico y minerales; menor relación LA/Lactosa (~0.017 g/g) mejor con Dia-NF + ED.	Talebi et al. (2020)
Nanofiltración + Diafiltración (NF + DF)	pH ~4, Temp. ~50 °C; baja presión (12–14 bar).	UF para proteínas + decalcificación	UF para proteínas + decalcificación	Postras et al. (2024)
NF + Electrolysis + PEF (pulsed electric field)	NF para concentr. 4.33× seguido de ED bajo PEF 5 s/5 s	NF para concentración previa	~46.3% ácido láctico removido; ~70% desmineralización; mejores rendimientos de secado en polvo	Postras et al. (2025)

Nota. La tabla sintetiza la eficiencia de recuperación de ácido láctico/lactato según la tecnología de membrana, condiciones operacionales y pretratamiento reportados en la literatura (2021–2025).

3.2. Factores que afectaron la eficiencia de recuperación

Los siguientes factores se identificaron como determinantes para que el proceso tuviera éxito: la presión de operación, que definió la eficiencia de separación y el flujo; la selectividad de la membrana y el pH de operación, que impactó en la estabilidad del ácido láctico; el pretratamiento del suero, que aumentó la eficiencia y disminuyó el ensuciamiento; así como el tipo y material de la membrana utilizada (Simonič & Novak Pintarič, 2021; Hofmann & Hamel, 2023; Brião et al., 2024). Adicionalmente, influyeron la temperatura de operación, la concentración inicial de sólidos, así como el diseño del sistema de filtración (tangencial o frontal) (Onesti et al., 2025).

4. Discusión

La revisión bibliográfica actual muestra que la revalorización del suero ácido mediante tecnologías de membranas es un gran paso para la gestión sustentable de subproductos lácteos. Aunque la nanofiltración es altamente eficiente para recuperar ácido láctico y lactato (más del 90 % en condiciones optimizadas 57, 58), su aplicabilidad se ve limitada por el fouling de la membrana (Onesti et al., 2025; Zinatloo-Ajabshir et al., 2021) también existen informes exitosos de uso de ultrafiltración y biorreactores de membrana para separar y concentrar compuestos valiosos (Kuo et al., 2025b)

La revalorización del suero ácido por tecnologías de membranas es una de las vías más prometedoras para la gestión sostenible de los subproductos de la industria láctea, evitando la contaminación y generando productos de alto valor agregado, como ácido láctico y lactato (Onesti et al., 2025; Constanza, 2025; Prazeres et al., 2014). El estudio muestra que la eficiencia de recuperación está altamente influenciada por el tipo de membrana utilizada, el pretratamiento del suero, las condiciones de operación y la configuración del proceso, en línea con lo informado por Brião et al. (2024), Hofmann & Hamel (2023) y Pinto et al. (2023).

La nanofiltración es la mejor tecnología para recuperar ácido láctico con eficiencias mayores al 90 % al optimizar presión, temperatura y pH (Onesti et al., 2025; Brião et al., 2024). Esta eficiencia se debe a la elevada selectividad de las membranas para fracciones de bajo peso molecular (Talebi et al., 2021b). No obstante, la aparición de fouling o ensuciamiento constituye uno de los principales retos, ya que reduce el flujo de permeado y la vida útil de las membranas, incrementando los costos operativos y de mantenimiento (Simonič & Novak Pintarič, 2021; Hofmann & Hamel, 2023). Para reducir este problema, varios autores sugieren combinar etapas de pretratamiento con microfiltración y ultrafiltración, las cuales eliminan sólidos y macromoléculas causantes del fouling (Kamalesh et al., 2025).

La ultrafiltración, además de ser un pretratamiento, permite concentrar las proteínas y mejorar la eficiencia de las siguientes etapas en la purificación del ácido láctico. Por ejemplo, Guo et al. (2023) probaron que la ultrafiltración después de la microfiltración en un caldo fermentado logró una eficiencia de recuperación de ácido láctico del

93,6 % con reducciones significativas en turbidez, proteínas y azúcares totales (Guo et al., 2023a).

Por otra parte, en estudios recientes se ha demostrado que el desempeño de estas tecnologías está altamente influenciado por las características del suero ácido y las condiciones de operación, como el pH, la temperatura y las presiones de trabajo Papadopoulou et al. (2023). Mencionan que, en procesos de electrodiálisis y nanofiltración, el control del pH de la solución influye en la eficiencia de separación y en la pureza del ácido láctico recuperado. Esta integración ha hecho posible disminuir los costos operativos de los procesos convencionales de purificación, como la destilación, y ha abierto la puerta a la recuperación en la industria láctea.

La literatura actual destaca la combinación en serie de microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración para mejorar la eficiencia global, disminuir el consumo energético y minimizar los residuos (Cabrera-González et al., 2022). La microfiltración es una primera etapa eficaz, capaz de eliminar células microbianas y sólidos en suspensión sin pérdida de ácido láctico en ciertos medios fermentativos, simplificando las etapas posteriores de purificación (Guo et al., 2023b). La nanofiltración, en cambio, es capaz de retener azúcares y proteínas, pero deja pasar el ácido láctico con bajas pérdidas (Cabrera-González et al., 2022).

Para la microfiltración, Guo et al. (2023) probaron su eficacia en la limpieza inicial de caldos fermentados procedentes de residuos de cocina. En condiciones óptimas (100 kPa, pH 6, retrolavado de 3 min), se lograron eficiencias de remoción de turbidez del 92,8 % y de color en un 60 %, extendiendo la vida útil de las membranas y mejorando la eficiencia del proceso (Guo et al., 2023b).

Un punto importante que queda por resolver es la viabilidad económica y ambiental de estos procesos a escala industrial. Si bien los beneficios ambientales y la obtención de productos de alto valor agregado son evidentes, los costos de limpieza y reemplazo de membranas, el consumo energético y la generación de residuos pueden limitar su aplicación a gran escala (Kuo et al., 2025; Ostertag et al., 2023).

Además, la ausencia de estandarización de los parámetros de operación y la variedad de condiciones experimentales informadas dificultan la comparación entre estudios y la transferencia tecnológica (Talebi et al., 2021b). Por eso hace falta crear protocolos estandarizados y metodologías comparativas de rendimiento real de cada tecnología en entornos industriales.

Además, uno de los mayores problemas que afrontan estas tecnologías es el fouling de las membranas, es decir, la acumulación de sustancias no deseadas en la superficie de las membranas que reducen la eficiencia del proceso. Según Salatein et al. (2025), el ensuciamiento de las membranas es una de las principales causas que disminuyen el rendimiento de los procesos de separación, restringiendo su uso a nivel industrial. Esto ha impulsado el desarrollo de métodos para reducir el ensuciamiento y prolongar la vida útil de las membranas, tales como materiales más resistentes al

fouling o el pretratamiento de los fluidos de alimentación. Pero la optimización de estos procesos es un campo abierto de investigación.

En el marco de la economía circular y la bioeconomía, la valorización del suero ácido es una oportunidad para convertir un residuo contaminante en materia prima industrial, mejorando la rentabilidad y sostenibilidad de la industria láctea y apoyando los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Onesti et al., 2025; Constanza, 2025; Ostertag et al., 2023; Yáñez-Vergara et al., 2025). Las futuras líneas de investigación pasan por el desarrollo de nuevos materiales de membrana, la automatización de los procesos de limpieza y la integración de sistemas híbridos que minimicen el fouling y mejoren la eficiencia global (Hofmann & Hamel, 2023; Pinto et al., 2023).

En conclusión, las tecnologías de membranas muestran un alto potencial para la recuperación eficiente de ácido láctico/lactato a partir de suero ácido. Por ejemplo, la microfiltración no genera pérdidas significativas de ácido láctico y la nanofiltración permite la separación efectiva de compuestos indeseados, facilitando así la purificación (Alexandri et al., 2018). Además, la nanofiltración acoplada a diafiltración ha demostrado una eliminación de ácido láctico del 91 % y una pureza de lactosa del 95 % (Onesti et al., 2025).

No obstante, la implementación a gran escala de estas tecnologías enfrenta desafíos técnicos, económicos y ambientales, como la optimización de las membranas para maximizar la selectividad y mitigar el ensuciamiento, así como la evaluación de la viabilidad económica y el impacto ambiental (Alexandri et al., 2018; Onesti et al., 2025). En este contexto, una colaboración multidisciplinaria será fundamental para consolidar estos procesos en la industria láctea del futuro.

5. Conclusiones

Esta revisión sistemática demuestra que el suero ácido, considerado hasta el momento un desecho de la industria láctea, puede ser aprovechado mediante tecnologías de membranas como la nanofiltración. Esta última logra una recuperación de lactato/ácido láctico superior al 80 % al optimizar variables como pH, presión y temperatura. La microfiltración y la ultrafiltración son buenos pretratamientos para remover sólidos y mejorar el desempeño de las membranas. Por otro lado, la combinación de estas tecnologías con electrodiálisis ofrece ventajas adicionales en términos de eficiencia de separación y reducción de la carga mineral del suero. Pero los fenómenos de ensuciamiento (fouling) afectan la estabilidad y aumentan los costos con el tiempo.

Los resultados muestran que las condiciones de operación (presión, pH, temperatura) influyen en la eficiencia de recuperación del ácido láctico y señalan la necesidad de protocolos experimentales estandarizados para la transferencia tecnológica. Si bien los desafíos relacionados con el costo de la inversión y el mantenimiento de las membranas son altos, estas tecnologías son una alternativa sustentable y viable desde el punto de vista ambiental y económico, transformando un desecho

contaminante en productos de alto valor agregado, bajo un modelo de reutilización y aprovechamiento de recursos.

Contribución de los autores: Conceptualización, L.G.G.G. y M.I.C.L.; metodología, G.A.A.A.; análisis formal, OAGM Y ALGG.; investigación, O.A.G.M y A.L.G.G.; recursos, L.G.G.G. y M.I.C.L; redacción del borrador original, O.A.G.M. y G.A.A.A.; redacción, revisión y edición, O.A.G.M y A.L.G.G.; visualización, O.A.G.M. y L.G.G.G.; supervisión, O.A.G.M. y A.L.G.G. Todas las autoras han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no ha recibido financiación externa

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos están disponibles previa solicitud a los autores de correspondencia: ogranda@utmachala.edu.ec

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Referencias Bibliográficas

- Alexandri, M., Schneider, R., & Venus, J. (2018). Membrane Technologies for Lactic Acid Separation from Fermentation Broths Derived from Renewable Resources. *Membranes*, 8(4), 94. <https://doi.org/10.3390/membranes8040094>
- Beaulieu, M., Perreault, V., Mikhaylin, S., & Bazinet, L. (2020). How Overlimiting Current Condition Influences Lactic Acid Recovery and Demineralization by Electrodialysis with Nanofiltration Membrane: Comparison with Conventional Electrodialysis. *Membranes*, 10(6), 113. <https://doi.org/10.3390/membranes10060113>
- Brião, V. B., Mossmann, J., Seguenka, B., Graciola, S., & Piccin, J. S. (2024). Integrating Whey Processing: Ultrafiltration, Nanofiltration, and Water Reuse from Diafiltration. *Membranes*, 14(9), 191. <https://doi.org/10.3390/membranes14090191>
- Cabrera-González, M., Ahmed, A., Maamo, K., Salem, M., Jordan, C., & Harasek, M. (2022). Evaluation of Nanofiltration Membranes for Pure Lactic Acid Permeability. *Membranes*, 12(3), 302. <https://doi.org/10.3390/membranes12030302>
- Constanza, F. S. C. (2025). Recuperación y concentración de proteínas del suero de leche mediante ultrafiltración y nanofiltración. https://repositorio.udec.cl/items/71d6d24d-8e28-4a1b-95d3-0cc3f721c833?utm_source=openai
- Colmenares APA, Suárez GAP, Báez YTC, De Jesús Muvdi Nova C, Sakharov IY. Review. Aplicaciones del lactosuero y sus derivados proteínicos. *CIENCIA EN DESARROLLO* [Internet]. 19 de julio de 2023;14(2):139-55. Disponible en: <https://doi.org/10.19053/01217488.v14.n2.2023.15002>

- Guo, Y., Li, C., Zhao, H., Gao, M., & Wang, Q. (2023a). The Performance of Ultrafiltration Process to Further Refine Lactic Acid from the Pre-Microfiltered Broth of Kitchen Waste Fermentation. *Membranes (Basel)*, 13(3), 330. <https://doi.org/10.3390/membranes13030330>
- Guo, Y., Li, C., Zhao, H., Gao, M., & Wang, Q. (2023b). The Performance of Microfiltration Process for Purifying Lactic Acid in the Fermented Broth of Kitchen Waste. *Membranes (Basel)*, 13(3), 280. <https://doi.org/10.3390/membranes13030280>
- Hofmann, K., & Hamel, C. (2023). Screening and scale-up of nanofiltration membranes for concentration of lactose and real whey permeate. *Membranes*, 13(2), 173. <https://doi.org/10.3390/membranes13020173>
- Kamalesh, R., Saravanan, A., Yaashikaa, P., Vickram, A., & Thiruvengadam, S. (2025). Recent insights into membrane separation technology for partitioning of nutritional components in dairy products - mechanism and applications. *International Dairy Journal*, 169, 106340. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2025.106340>
- Kumar, N., Heena, Dixit, A., Mehra, M., Daniloski, D., Trajkovska Petkoska, A. (2023). Utilization of Whey: Sustainable Trends and Future Developments. In: Poonia, A., Trajkovska Petkoska, A. (eds) *Whey Valorization*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5459-9_3
- Kuo, C., Chen, D., Jiménez-Flores, R., Wick, M., & Campanella, O. (2025). Sustainable valorization of fish byproducts and acid whey through lactic acid bacteria fermentation into bioactive hydrolysates. *Sustainable Food Technology*, 3(6), 1766–1780. <https://doi.org/10.1039/d5fb00444f>
- Kuo, C., Chen, D., Jiménez-Flores, R., Wick, M., & Campanella, O. (2025b). Sustainable valorization of fish byproducts and acid whey through lactic acid bacteria fermentation into bioactive hydrolysates. *Sustainable Food Technology*, 3(6), 1766–1780. <https://doi.org/10.1039/d5fb00444f>
- Naydenova G, Dobрева L, Danova S, Popova-Krumova P, Yankov D. Comparison of Lactic Acid Production from Different Agro-Industrial Waste Materials. *Fermentation* [Internet]. 30 de julio de 2025;11(8):437. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/fermentation11080437>
- Onesti, R., Roselli, M., Boi, C., & Bandini, S. (2025). Nanofiltration efficiency in the purification of lactose from ultrafiltered acid whey. *Journal of Food Engineering*, 407, 112851. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112851>
- Ostertag, F., Krolitzki, E., Berensmeier, S., & Hinrichs, J. (2023). Protein valorisation from acid whey – Screening of various micro- and ultrafiltration membranes concerning the filtration performance. *International Dairy Journal*, 146, 105745. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2023.105745>

- Papadopoulou, E., González, M. C., Reif, D., Ahmed, A., Tsapekos, P., Angelidaki, I., & Harasek, M. (2023). Separation of lactic acid from fermented residual resources using membrane technology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110881. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110881>
- Pinto, A. M., et al. (2023). Integration of Membrane Processes for By-Product Valorization to Improve the Eco-Efficiency of Small/Medium Size Cheese Dairy Plants. *Foods*, 10(8), 1740. <https://doi.org/10.3390/foods10081740>
- Pires, A. F., Marnotes, N. G., Rubio, O. D., Garcia, A. C., & Pereira, C. D. (2021). Dairy By-Products: A review on the Valorization of whey and second Cheese whey. *Foods*, 10(5), 1067. <https://doi.org/10.3390/foods10051067>
- Poitras, D., Perreault, V., Gaaloul, S., Schuck, P., & Bazinet, L. (2025). *Lactic acid removal and demineralization of acid whey by coupling electro dialysis under pulsed electric fields with pre-concentration by nanofiltration: Impact on spray drying and powder quality*. *Desalination*, 613, 119032. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119032>
- Poitras, D., Schuck, P., & Bazinet, L. (2024). *Nanofiltration combined with diafiltration for improved deacidification and lactose recovery of acid whey*. *Science of The Total Environment*, 927, 162042. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.162042>
- Prazeres, A. R., et al. (2014). Techno-economic viability of innovative membrane systems in water and mass recovery from dairy wastewater. *Journal of Membrane Science*, 458, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.01.058>
- Salatein, N. M., Abdelghany, A., Elmowafy, B., Hassan, R. K., Omara, A. F., Mansour, A. R., & Fahim, I. S. (2025). Lactic acid separation technologies: Enhancing efficiency and purity using membrane separation technology (mini review). *Results in Chemistry*, 15, 102280. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102280>
- Simonič, M., & Pintarič, Z. N. (2021). Study of Acid Whey Fouling after Protein Isolation Using Nanofiltration. *Membranes*, 11(7), 492. <https://doi.org/10.3390/membranes11070492>
- Soumati B, Lazraq A, Benabderrahmane A, Atmani M. From gutter to value: Valorization of acid whey from fresh cheese using membrane filtration. *Ecological Engineering & Environmental Technology* [Internet]. 31 de marzo de 2025b;26(5):276-86. Disponible en: <https://doi.org/10.12912/27197050/203125>
- Alebi, S., Suarez, F., Chen, G. Q., Chen, X., Bathurst, K., & Kentish, S. E. (2020). *Pilot study on the removal of lactic acid and minerals from acid whey using membrane technology*. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06561>

Talebi, S., Garthe, M., Roghmans, F., Chen, G. Q., & Kentish, S. E. (2021). Lactic acid and salt separation using membrane technology. *Membranes*, 11(2), 107. <https://doi.org/10.3390/membranes11020107>

Zinatloo-Ajabshir, S., Heidari-Asil, S. A., & Salavati-Niasari, M. (2021). Simple and eco-friendly synthesis of recoverable zinc cobalt oxide-based ceramic nanostructure as high-performance photocatalyst for enhanced photocatalytic removal of organic contamination under solar light. *Separation and Purification Technology*, 267, 118667. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118667>