

**ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
PROCESO DE CONCENTRACIÓN DE LACTOSUERO SUBPRODUCTO DE LA
INDUSTRIA LÁCTEA PARA LA PRODUCCIÓN DE CONCENTRADO DE
PROTEÍNA EN POLVO.**

**LEIDY STEFANIA VALLEJO
INGRID TATIANA CASTRO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2025

**ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
PROCESO DE CONCENTRACIÓN DE LACTOSUERO SUBPRODUCTO DE LA
INDUSTRIA LÁCTEA PARA LA PRODUCCIÓN DE CONCENTRADO DE
PROTEÍNA EN POLVO.**

**LEIDY STEFANIA VALLEJO
INGRID TATIANA CASTRO**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

**DIRECTOR:
JUAN CARLOS GÓMEZ, Dr. Eng.**

**CODIRECTOR:
DAVID ANDRÉS GÓMEZ RÍOS, PhD.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2025

TABLA DE CONTENIDO.

INTRODUCCIÓN.	0
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	0
JUSTIFICACIÓN.	1
OBJETIVO GENERAL.	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	3
1.MARCO TEÓRICO.	3
1.1 Lactosuero.	3
1.2 Concentrado proteico.	5
1.3 Filtración por membrana.	5
1.3.1 Microfiltración (MF).	6
1.3.2 Ultrafiltración (UF).	6
1.3.3 Nanofiltración (NF).	7
1.4 Secado por aspersión.	7
2.ANTECEDENTES.	8
3.METODOLOGÍA.	10
3.1 Obtención y pretratamiento.	10
3.2 Medición de pH.	10
3.3 Cuantificación espectrofotométrica de las proteínas.	11
3.4 Medición de acidez.	12
3.5 Porcentaje de grasa.	12
3.6 Medición de densidad.	13
3.7 Medición de lactosa.	13
3.8 Sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales.	14
3.9 Filtración por membrana.	15
3.10 Secado por aspersión.	16
3.11 Escalado.	18
4.RESULTADOS Y ANÁLISIS.	19

4.1 Caracterización y pretratamiento del lactosuero.	19
4.2 Filtración por membrana.	21
4.3 Secado por aspersión.	26
4.4 Escalado.	30
4.4.1 Escalado para la obtención de proteína de lactosuero en polvo.	31
4.4.2 Escalado para la obtención de lactosuero en polvo.	33
4.5 Caracterización final.	35
5.CONCLUSIONES.	35
6. RECOMENDACIONES.	37
7. REFERENCIAS.	38
8.ANEXOS.	47
Anexo A. Simulación en Super Pro Designer para la obtención de concentrado de proteína en polvo al 27%.	47
Anexo B. Simulación en Super Pro Designer para la obtención de lactosuero en polvo.	47

RESUMEN:

El presente trabajo evaluó la factibilidad técnica y económica de un proceso preliminar para la valorización del lactosuero, subproducto de la industria láctea, orientado a obtener proteína en polvo. La investigación inició con la caracterización fisicoquímica del lactosuero suministrado por Alimentos La Cofradía, identificando su potencial como materia prima para la concentración de proteínas según la Normativa Técnica Colombiana 2797 de 2007. Posteriormente, se implementó un sistema de microfiltración utilizando membranas de nitrato de celulosa de 0,2 micras, evaluando la influencia de la presión y el tiempo de operación sobre el rendimiento y la concentración proteica.

Los resultados experimentales mostraron que una presión de 3 bar y un tiempo de 20 minutos son las condiciones óptimas, alcanzando un rendimiento de retención proteica del 21% y una concentración de proteínas en el retenido del 27%. En el proceso de secado por aspersión, se evaluaron distintas combinaciones de temperatura y flujo de alimentación. Se determinó que operar a 180 °C y un flujo de 227 mL/h permitió obtener polvo final con contenido de humedad del 8% y un rendimiento de sólidos del 62%, cumpliendo los estándares de calidad requeridos para el producto final.

Para analizar la viabilidad económica, se realizó la simulación del proceso en el software SuperPro Designer, comparando dos alternativas: secado posterior a la microfiltración y secado directo sin dicha etapa. El análisis evidenció que el secado sin microfiltración resulta más factible técnica y económicamente, logrando un margen bruto del 33,13%. Esto sugiere que, aunque la microfiltración mejora la concentración de proteínas, su incorporación incrementa los costos operativos sin una mejora proporcional en la rentabilidad global.

El estudio permite concluir que es posible valorizar el lactosuero mediante un proceso de secado directo, obteniendo un producto con características adecuadas para su comercialización con un balance económico favorable y sostenible.

Palabras clave:

Lactosuero, microfiltración, proteína en polvo, secado por aspersión.

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Composición general del lactosuero y distribución proteica (Proveda, 2013).	4
Tabla 2. Parámetros de caracterización del lactosuero.	20
Tabla 3. Diseño experimental de membrana.	21
Tabla 4. Diseño experimental secador por aspersión.	26
Tabla 5. Especificaciones de la membrana.	31
Tabla 6. Especificaciones del secador por aspersión.	31
Tabla 7. Resumen ejecutivo (precios abril 2025).	32
Tabla 8. Especificaciones del secador por aspersión para lactosuero en polvo.	33
Tabla 9. Resumen ejecutivo de lactosuero en polvo (precios abril 2025).	34
Tabla 10. Caracterización final.	35

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Curva de calibración de proteína de lactosuero.	11
Figura 2. Curva de calibración de lactosa.	14
Figura 3. Montaje experimental en la celda de ultrafiltración.	16
Figura 4. Montaje experimental del secado por aspersión.	18
Figura 5. Residuo después del pretratamiento.	19
Figura 6. Diagrama de Pareto estandarizado de la variable de respuesta rendimiento.	22
Figura 7. Diagrama de Pareto estandarizado de la variable de respuesta concentración de la proteína.	23
Figura 8. Gráfica de probabilidad normal de la variable de respuesta rendimiento.	23
Figura 9. Gráfica de probabilidad normal de la variable de respuesta concentración de proteína.	24
Figura 10. Comportamiento del flujo permeado en el tiempo.	25
Figura 11. Diagrama de Pareto estandarizado de la variable humedad final, %.	27
Figura 12. Diagrama de Pareto estandarizado de la variable Rendimiento de sólidos, %.	28
Figura 13. Gráfica de probabilidad normal de la variable de respuesta humedad.	28
Figura 14. Gráfica de probabilidad normal de la variable de respuesta rendimiento de sólidos.	29
Figura 15. Lactosuero en polvo a 180 °C y 227 mL/h.	30

INTRODUCCIÓN.

La producción láctea en Colombia ha experimentado un crecimiento significativo, alcanzando anualmente 7.800 millones de litros de leche. De esta cantidad, aproximadamente un 10% se convierte en lactosuero (Superintendencia de Industria y Comercio, 2021), un subproducto esencial de la leche procesada formalmente. Sin embargo, cerca del 50% de esta producción proviene del sector informal, lo que dificulta el seguimiento de cómo se están utilizando en el país cerca de 800 millones de litros de lactosuero al año.

De las prácticas más comunes en las queserías que carecen de procesos de investigación y desarrollo es el uso de manera subóptima, siendo destinado en gran medida como abono o alimento para animales; y además la falta de valor agregado en la gestión del lactosuero ha llevado incluso a su descarte (Salazar, 2023), contribuyendo a la gestión inadecuada que afecta directamente a la calidad de los suelos y cuerpos de agua.

La posición del lactosuero como un desecho ha sido cuestionada por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA), que en 2021 afirmó que, correctamente tratado, este subproducto no representa un riesgo para la salud humana y puede ser aprovechado como ingrediente o materia prima en la industria alimentaria (Salazar, 2023).

Es por ello que surge la necesidad de repensar la gestión del lactosuero en la industria láctea colombiana. El siguiente trabajo se enfocará en abordar este desafío, proponiendo la aplicación de tecnologías como la filtración por membrana y el secado por aspersion, para obtener concentrados de proteína de suero en polvo. Este enfoque no solo busca optimizar el aprovechamiento del lactosuero, sino también reducir su impacto ambiental y fortalecer la competitividad del sector lácteo colombiano.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la industria de producción de derivados lácteos en Nariño, se generan grandes cantidades de lactosuero como subproducto de la elaboración del queso. A pesar de su alto contenido proteico, este no cuenta con alternativas de aprovechamiento en la región donde se producen aproximadamente 180.000 L de suero por día (Mincomercio, sf), que suelen ser vertidos por

tuberías hasta llegar a fuentes hídricas como los ríos, lo que conlleva a las empresas a tener problemas de eliminación y gestión ambiental.

Además, las empresas en la región de Nariño no cuentan con Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Esto significa que el lactosuero, que es un efluente con alta carga orgánica con alrededor de 350 mg/L de demanda biológica de oxígeno (DBO) y cerca de 680 mg/L de demanda química de oxígeno (DQO) (Universidad Nacional de Colombia, 2020), contiene lactosa, ácido láctico, grasas y proteínas; que se descargan directamente en el medio ambiente sin tratamiento previo, lo que puede causar graves problemas ambientales como la contaminación del agua y del suelo, afectando la vida acuática, la productividad del suelo y la salud humana.

Considerando el impacto ambiental y económico que tiene la descarga de lactosuero como efluente del proceso de producción de derivados lácteos, es necesario evaluar la implementación de una alternativa que permita obtener valor de este subproducto al tiempo que se reduce la carga contaminante generada por esta industria.

JUSTIFICACIÓN.

El sector lácteo en Colombia se destaca por su relevancia en la economía del país y su papel crucial en la alimentación y la canasta familiar. Esta industria contribuye con el 1,23% al Producto Interno Bruto (PIB) nacional y representa el 24,3% del PIB agropecuario (Vega, 2018). Además, genera alrededor de 700.000 empleos anuales distribuidos en 400.000 unidades de producción (adminCVN, 2018). Empresas destacadas, como Colanta, Alquería, Parmalat, Gloria y Crem Helado juegan un papel significativo en este sector, reportando ingresos operacionales notables, como los \$2,2 billones registrados en 2018 (Ganadero, 2023).

Sin embargo, esta actividad en el país cuenta con diferentes niveles de tecnificación y en las pequeñas industrias la generación de lactosuero como subproducto de los procesos de elaboración del queso plantea desafíos en términos de costos y cumplimiento de la normatividad ambiental. La descarga de este subproducto sin un tratamiento en una PTAR implica la liberación de una alta carga orgánica con valores de demanda biológica de oxígeno de 350 mg/L y demanda química de oxígeno de 680 mg/L (Universidad Nacional de

Colombia, 2020), causando graves daños en los cuerpos de agua donde se vierte. Esto puede llevar a la eutrofización, un fenómeno que ocurre cuando un cuerpo de agua adquiere una concentración excesiva de nutrientes, provocando un crecimiento desmesurado de plantas y algas. Cuando estas plantas y algas mueren y se descomponen, consumen gran cantidad de oxígeno, lo que puede resultar en la muerte de otras formas de vida acuática. Además, como mencionan Guerrero Rodríguez et al. (2009) la descarga de lactosuero puede favorecer el crecimiento de bacterias anaerobias, que pueden contribuir a la liberación de gases de efecto invernadero y generar olores desagradables.

La exploración de usos alternativos para el lactosuero, tales como la generación de combustibles, producción de biopolímeros y biomasa, creación de productos cosméticos, elaboración de fertilizantes agrícolas, y la obtención de concentrados de proteínas, entre otras aplicaciones (Zambrano & Rivadeneira, 2021), no solo atenúa su impacto ambiental, sino que también respalda la sostenibilidad de la industria, alineándose con las crecientes demandas de prácticas responsables.

Entre las alternativas más prometedoras, destaca la elaboración de concentrados de proteínas en polvo. Estos concentrados son notablemente ricos en proteínas de alto valor biológico, poseen facilidad de almacenamiento y transporte, y ofrecen diversas aplicaciones en la industria alimentaria, incluyendo el yogurt, queso procesado y una variedad de bebidas. Asimismo, se utilizan en la fabricación de salsas, helados, productos lácteos derivados, productos de panadería, carne y formulaciones infantiles, gracias a sus excepcionales propiedades funcionales y beneficios nutricionales. Es importante destacar que los concentrados de proteína de suero están especialmente formulados para su uso en aplicaciones como gelificación, emulsificación y formación de espuma (Parra, 2009).

La capacidad de aprovechar este subproducto en la producción de alimentos y suplementos no solo impulsa la innovación, sino que también mejora la competitividad en diversos mercados industriales, contribuyendo así a la economía circular y al desarrollo sostenible.

OBJETIVO GENERAL.

- Establecer a escala preliminar la viabilidad técnica de la implementación de un proceso de concentración de lactosuero subproducto de la industria láctea para la producción de concentrado de proteína en polvo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Evaluar un sistema de filtración por membrana como alternativa para la separación de las proteínas de lactosuero como primera etapa de concentración.
- Determinar condiciones de operación adecuadas para el secado por aspersión de lactosuero.
- Dimensionar de forma preliminar las unidades de proceso requeridas para el proceso de concentración de proteína de suero lácteo según las condiciones de operación y flujos de materia prima previamente determinados.

1.MARCO TEÓRICO.

1.1 Lactosuero.

El lactosuero (LS) se define como un producto lácteo obtenido de la separación del coágulo de la leche, de la crema o de la leche semidescremada durante la fabricación del queso, mediante la acción ácida o de enzimas del tipo del cuajo (renina, enzima digestiva de los rumiantes) que rompe el sistema coloidal de la leche en dos fracciones: Una fracción sólida, compuesta principalmente por proteínas insolubles y lípidos, las cuales en su proceso de precipitación arrastran y atrapan minoritariamente algunos de los constituyentes hidrosolubles. La otra, es una fracción líquida, correspondiente al lactosuero en cuyo interior se encuentran suspendidos todos los otros componentes nutricionales que no fueron integrados a la coagulación de la caseína. En el lactosuero se encuentran partículas suspendidas solubles y no solubles (proteínas, lípidos, carbohidratos, vitaminas y minerales), y compuestos de importancia biológica-funcional (Proveda, 2013). En la Tabla 1 se muestra la composición nutricional del lactosuero.

El lactosuero puede ser dulce o ácido, el dulce se obtiene en la producción del queso por la coagulación de la caseína utilizando cuajo a un pH de 6,5. Mientras que el lactosuero ácido resulta de la fabricación del yogur, mediante un proceso de fermentación con agregado de ácidos orgánicos para coagular la caseína (Parra, 2009).

Tabla 1. Composición general del lactosuero y distribución proteica (Proveda, 2013).

Componente	Observación
Lactosa	95% de la lactosa de la leche, en una proporción de (4,0-5,0 % p-v). 46,0-52,0 g/L en lactosuero dulce y 44,0-46,0 de lactosuero ácido.
Proteína	En una proporción 0,8-1,0% p/v. Corresponde a alrededor del 25% de las proteínas contenidas normalmente en la leche. 6,0-8,0 g/L en lactosuero dulce y 6,0-8,0 g/L en lactosuero ácido. Alto contenido de aminoácidos (Leucina, isoleucina, lisina, valina) vs proteínas de referencia, caseína, proteína de soya y proteína humana.
α -Lactoalbúmina	30% del total del contenido proteico.
β -Lactoglobulina	Es importante porque tiene propiedades emulsionantes y cumple una función importante al interactuar con compuestos como el retinol y los ácidos grasos.
Globulina	Corresponden al 10% del total de proteínas.
Proteasas-peptonas	Corresponden al 10% del total de proteínas. Lactoferrinas, albúmina (idéntica a la albúmina sérica de la sangre), inmunoglobulinas, factores de crecimiento, glicoproteínas y enzimas (nucleasas, lactoperoxidasas, xantina oxidasa, lipasa esterasa, amilasa, fosfatasas ácidas y alcalinas, lisozima, aldolasa, catalasa, inhibidor de la tripsina, lactosa sintetasa, ceruloplasmina, sulfidril dril oxidasa y otras). Son proteínas de alto valor biológico al proporcionar aminoácidos esenciales para el organismo, entre ellos, triptófano y leucina.

Lípidos	0,5% y 8% de la materia grasa de la leche.
Vitaminas	Tiamina 0,38 mg/mL; Riboflavina 1,2 mg/mL; Ácido nicotínico 0,85 mg/mL Ácido Pantoténico 3,4 mg/mL; Piridoxina 0,42 mg/mL; Cobalamina 0,03 mg/mL; Ácido ascórbico 2,2 mg/mL.
Minerales	8-10% del extracto seco. Calcio (0,4-0,6 g/L en lactosuero dulce y 1.2-1.6 g/L) en lactosuero ácido), potasio, fósforo, sodio y magnesio.
Compuestos biológicamente activos y péptidos bioactivos.	Para ejercer determinados efectos biológicos y fisiológicos. Con potencial antihipertensivo, actividad antimicrobiana, antioxidante, incremento de la saciedad, entre otros.

1.2 Concentrado proteico.

El concentrado de proteínas en el lactosuero se logra eliminando los componentes no proteicos del suero lácteo pasteurizado, ya sea dulce o ácido. Este proceso garantiza que el producto final seco contenga un porcentaje de proteínas que oscila entre el 20% y el 80%. Para lograr esto, se emplean técnicas físicas de separación, como la precipitación o la filtración, estos métodos permiten concentrar selectivamente las proteínas, reteniendo componentes más grandes y permitiendo el paso de agua y componentes más pequeños. Una vez obtenido el concentrado se somete a un proceso de secado por aspersión que permite mantener la integridad de las proteínas y facilita su almacenamiento y transporte. Finalmente, el producto final es sometido a evaluaciones de calidad para garantizar su contenido proteico, sabor, olor y pureza según la normativa técnica colombiana NTC 2997 de 2007.

1.3 Filtración por membrana.

La filtración mediante membranas es un método utilizado para separar solutos disueltos en un líquido según sus pesos moleculares. En la industria láctea, este proceso ha sido fundamental desde su adopción en los años sesenta, permitiendo clarificar, concentrar y fraccionar

diversos productos lácteos (Ramírez et al., 2016). Una de las primeras aplicaciones de esta tecnología en la industria láctea fue el uso de ultrafiltración y ósmosis inversa para concentrar la leche, lo que marcó un hito en la evolución de los procesos de producción en esta industria (Lipnizki, 2010).

La industria láctea comenzó a utilizar membranas en la década de 1970, y desde entonces sigue contribuyendo al progreso de este sector. En la actualidad, se emplean principalmente tecnologías de membranas impulsadas por presión, que se clasifican según el tamaño de los poros y el límite del peso molecular. (Carter, 2021) Estas son las siguientes:

1.3.1 Microfiltración (MF).

Se utiliza para retener sólidos en suspensión en líquidos lácteos, ya sea como etapa de limpieza, concentración o pretratamiento (Ibáñez Lorente, 2007). En ciertas circunstancias, la MF puede eliminar completamente bacterias y esporas de la leche y sus derivados, extendiendo así su vida útil como alternativa a la ultrapasteurización (Saboya & Maubois, 2000; Griep et al., 2018). Al aplicar la MF, se pueden evitar sabores a cocido, eliminar células muertas y sus enzimas potencialmente activas, y producir derivados lácteos de alta calidad, como el concentrado de proteínas de suero (WPC) y el aislado de proteínas de suero (WPI), manteniendo intactas las propiedades funcionales de las proteínas (Lipnizki, 2010).

Por otro lado, la presencia de grasa en los líquidos lácteos afecta sus propiedades y vida útil. Para eliminar la grasa residual, se ha desarrollado un método que utiliza la capacidad de los fosfolípidos para agregarse en presencia de calcio bajo un tratamiento térmico moderado, conocido como precipitación termocálcica. El líquido separado de grasa se obtiene como permeado de la MF utilizando membranas con un tamaño de poro específico. El retenido, rico en fosfolípidos, puede usarse como agente emulsionante en alimentos y cosméticos. El concentrado de proteínas de suero desgrasado resultante tiene propiedades similares a la clara de huevo y se puede utilizar en la producción de pasteles y helados (Fauquant et al., 1985; Karleskind et al., 1995).

1.3.2 Ultrafiltración (UF).

Es un proceso de separación que emplea membranas con poros muy finos, con un rango de tamaño típicamente entre 10 y 1.000 Å (Ramírez et al., 2017). Esta técnica permite

concentrar grandes moléculas y macromoléculas con pesos moleculares comprendidos entre 1 y 200 kDa, incluyendo aquellas presentes en los líquidos lácteos. Por consiguiente, las membranas utilizadas en UF suelen tener poros con un diámetro aproximado de 0,01 μ (Rosenberg, 1995). La ultrafiltración (UF) ha sido utilizada exitosamente en el fraccionamiento de leche, suero y proteínas (Bhattacharjee et al., 2006).

En el proceso de ultrafiltración por membrana, se pueden ajustar múltiples condiciones operativas. Estas son: la temperatura; el flux, que es la cantidad de material que atraviesa la membrana por unidad de área y por unidad de tiempo; y la presión transmembrana, que es la diferencia entre la presión de entrada y la presión de salida del fluido. Además, el flujo tangencial, que es el flujo que se mueve en paralelo a la superficie de la membrana, también se puede alterar.

1.3.3 Nanofiltración (NF).

Es un proceso de separación que retiene partículas con un diámetro de poro inferior a 0,001 μ m (1 nm), permitiendo el paso de iones minerales monovalentes y agua, mientras retiene componentes de gran tamaño como la lactosa (De Carvalho & Maubois, 2010). Esta técnica facilita la concentración y desmineralización parcial del suero lácteo líquido. Debido a la selectividad de las membranas, la mayoría de los iones monovalentes, ácidos orgánicos y parte de la lactosa atraviesan la membrana. Se estima que la desmineralización alcanza un máximo del 35% de reducción del contenido de ceniza, con un factor de concentración de 3,5 a 4, aunque al implementar un paso de diafiltración (DF) se puede aumentar hasta un 45% (Lipnizki, 2010). Además, la NF reduce el consumo energético, y el producto resultante de la desmineralización parcial puede ser secado por pulverización y utilizado como aditivo alimentario (Schroën et al., 2010).

1.4 Secado por aspersión.

Es un proceso ampliamente empleado en diversas industrias como alimentos, polímeros y cerámicas. Este método implica convertir un componente líquido en un sólido seco de forma instantánea mediante la generación de diminutas gotas con una amplia área superficial (Adco Chura, 2018). El secado por aspersión cuenta con cuatro etapas de secado las cuales son

atomización, contacto aire- gota, evaporación, recuperación del producto. Pueden ser de discos o de boquillas (Filková, 2006).

El funcionamiento de este equipo se basa en la deshidratación de un líquido que fluye a través de una boquilla y, mediante rociadores internos, se atomiza para crear diminutas partículas. Simultáneamente, se introduce aire caliente en sentido contrario o en la misma dirección de la atomización para evaporar el agua. La humedad evaporada se libera por la parte superior del equipo (Antury Devia & Cubillos Oñate, 2016).

El material sólido es llevado por el flujo de aire caliente y se separa utilizando un ciclón. Al final del proceso, se obtiene un polvo seco (Agudelo, 2022). Los polvos obtenidos a través de la atomización deben poseer propiedades óptimas adaptadas a su uso final, y estas propiedades están influenciadas por factores como la densidad, contenido de sólidos, viscosidad, tensión superficial, temperatura de la suspensión, estado de floculación y distribución de tamaños de partícula de las materias primas. Además, las variables del equipo de secado, como temperatura, caudal y humedad del aire de secado, presión de inyección y diámetro de evacuación del inyector, también juegan un papel crucial en este proceso (Mondragon et al., 2013).

2.ANTECEDENTES.

El lactosuero ha capturado la atención de la industria alimentaria gracias a su impresionante riqueza en componentes esenciales como la lactosa, proteínas, grasas y minerales (Parra, 2009). Estos constituyentes, pueden ser aprovechados para diversas aplicaciones, desde la producción de ingredientes funcionales con propiedades nutricionales mejoradas hasta la formulación de bebidas fermentadas. El estudio y desarrollo de técnicas para la obtención de concentrados de proteínas a partir del lactosuero han experimentado un notable interés creciente que se atribuye no solo a la necesidad de aprovechar de manera eficiente los recursos disponibles, sino también a la creciente demanda del mercado en busca de productos alimenticios fortificados y sostenibles.

Faría et al. (2003) estudiaron la eficiencia de concentración de las proteínas del suero con una planta móvil compuesta por un módulo de ultrafiltración y otro de nanofiltración;

encontrando que los permeado contenían 51,84% de proteína en el 20,29% de sólidos totales obtenidos.

Tovar Jimenez et al. (2012) evaluaron los métodos tradicionales para el aislamiento y concentración de proteína de suero obteniendo que el método más eficiente fue la ultrafiltración con contenido de proteína verdadera del 40-53% (w/w); además, encontraron que los productos mostraron una importante actividad antioxidante pero que la actividad antimicrobiana se vio afectada.

Tsakali et al. (2015) estudiaron la influencia de la presión transmembrana y la temperatura sobre el flujo y la capacidad de separación durante la ultrafiltración combinada con diafiltración continua para la producción del suero en polvo enriquecido en lactoferrina e inmunoglobulina G a partir de queso feta no tratado. Emplearon dos métodos de secado: por aspersión y liofilización y obtuvieron que todas las combinaciones dan lugar a un polvo con alto contenido en proteínas totales.

Prabhuzantye et al. (2019) investigaron algunas mejoras en la separación por membrana del suero y el posterior secado por aspersión para la recuperación del concentrado de proteína de suero. Para ello, realizaron un pretratamiento ultrasónico del suero para reducir la contaminación microbiana y establecieron que se obtienen importantes beneficios de intensificación del proceso con el uso de ultrasonidos tanto en la separación por membrana como en el secado por aspersión.

Banjare et al. (2019) formaron un complejo de hierro con concentrado de proteína de suero. Utilizaron técnicas de centrifugación y ultrafiltración para eliminar el hierro libre e insoluble de la solución. Para permitir la disponibilidad del complejo concentrado de proteína de suero-hierro (WPC-Fe) en forma de polvo, utilizaron la técnica de secado por aspersión. Como resultado obtuvieron que, el complejo era estable en diferentes condiciones de procesamiento y que la absorción de hierro unido del complejo fue significativamente mayor a la absorción de hierro de los alimentos y formulaciones orales.

Bejarano Toro et al. (2022) estudiaron la concentración de las proteínas de lactosuero dulce por ultrafiltración evaluando condiciones de proceso, el concentrado de proteína de suero tuvo 18,2% de sólidos totales, de los cuales la proteína representa el 45%. Sin embargo,

determinaron que su sistema fue menos estable ya que una mayor concentración de proteína puede resultar en más colisiones entre moléculas, generando floculación.

3.METODOLOGÍA.

3.1 Obtención y pretratamiento.

El lactosuero para este estudio fue obtenido de la empresa “Alimentos La Cofradía” ubicada en Nariño, se transportó en cantidades de 500 mL hasta el laboratorio de docencia de la Escuela de Ingeniería Química en la Universidad del Valle a una temperatura de de 3 °C aproximadamente para extender su durabilidad y evitar la proliferación de microorganismos (S. Imbera, 2019). Como pretratamiento para su posterior caracterización se utilizó una bomba de vacío marca DRYFAST de modelo 2034 para filtrar los 500 mL de lactosuero a través de un papel filtro de retención gruesa. Posteriormente, la muestra se sometió a centrifugación en un equipo marca DIGTOR 20C, operando a 1900 rpm durante 1 hora.

3.2 Medición de pH.

El pH del lactosuero es una propiedad cuyo carácter se tomó para su caracterización fisicoquímica, ya que este puede determinar si el sustrato es ácido o alcalino, y de esta propiedad dependerá su estabilidad y el proceso de valorización. Este parámetro puede variar dependiendo del tipo de suero y las condiciones del proceso de obtención (Mazorra-Manzano & Moreno-Hernández, 2019).

Para la medición del pH, se utilizó un pH-metro marca Eijkelkamp, previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4,0 y 7,0 para garantizar la precisión de los resultados. El procedimiento se llevó a cabo de la siguiente manera: Se prepararon las soluciones buffer y se verificó que el pH-metro estuviera en condiciones óptimas de funcionamiento según las instrucciones del fabricante. Posteriormente, se sumergió el electrodo del pH-metro en la muestra de lactosuero previamente homogeneizada y a temperatura ambiente (25 °C). Luego, se esperó aproximadamente un minuto para que la lectura se estabilizara antes de registrar el valor obtenido. Entre cada medición, el electrodo fue enjuagado con agua destilada para evitar contaminación entre muestras.

3.3 Cuantificación espectrofotométrica de las proteínas.

El método de Biuret es una técnica ampliamente utilizada para la cuantificación de proteínas en muestras complejas debido a su sensibilidad y especificidad. El principio que sustenta esta metodología se basa en la interacción de las proteínas con un reactivo que contiene sulfato cúprico, tartrato de sodio y potasio en un medio alcalino, formando un complejo coloreado cuya intensidad de color es proporcional a la concentración de proteínas presentes en la muestra. La detección se realiza en un espectrofotómetro UV-VIS midiendo la absorbancia en un rango específico de longitudes de onda, como se describe en Miwa et al. (2008) y Álvarez (2020). El método es muy sensible y se recomienda únicamente para medir las proteínas en preparados muy concentrados como el suero o preparados similares debido a sus limitaciones de sensibilidad en concentraciones bajas (Miwa et al., 2008).

Para la cuantificación de proteínas, se inició con la preparación de una curva de calibración utilizando proteína aislada de lactosuero a una concentración de 10 g/L. A partir de ella, se prepararon diluciones y a cada solución se le añadió el reactivo de Biuret, dándoles reposo a las soluciones durante 10 minutos a temperatura ambiente para garantizar la formación del complejo coloreado. Posteriormente, se midió la absorbancia en un espectrofotómetro UV-VIS (modelo JASCO V-730) a una longitud de onda de 552,2 nm, generando así la curva de calibración (Figura 1).

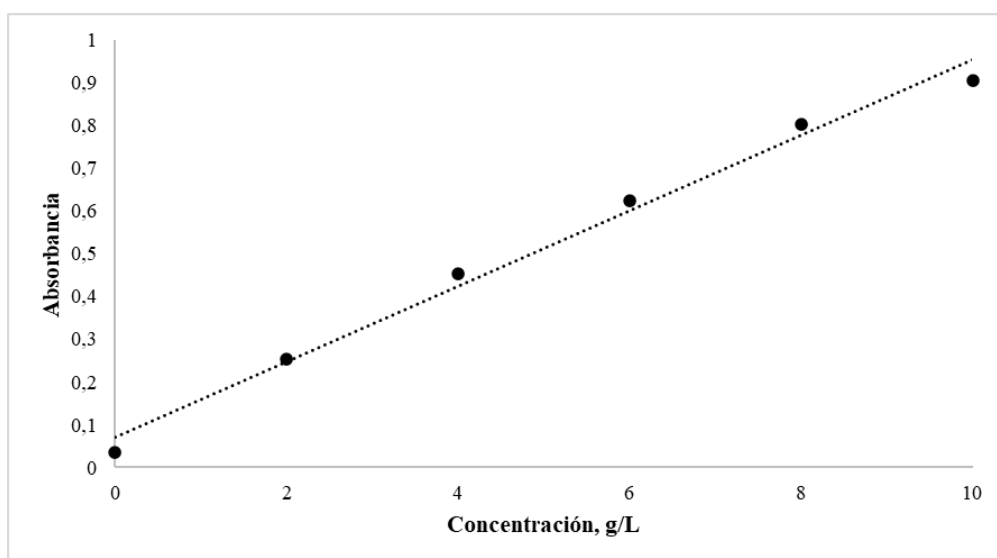


Figura 1. Curva de calibración de proteína de lactosuero.

Las muestras de lactosuero se trataron siguiendo el mismo protocolo, agregándoles el reactivo de Biuret y midiendo su absorbancia bajo las mismas condiciones. A partir de la ecuación derivada de la curva de calibración (Ecuación 1), se determinó la concentración de proteína en las muestras analizadas.

$$\text{Concentración (g/L)} = \frac{\text{Absorbancia} - 0,0711}{0,0882} \quad \text{Ec (1)}$$

3.4 Medición de acidez.

La acidez del lactosuero se determinó en grados Dornic (°D), una unidad que mide la concentración de ácido láctico presente en la muestra. El procedimiento se llevó a cabo mediante titulación utilizando hidróxido de sodio (NaOH) al 0,1 N estandarizado, con fenolftaleína (1 %) como indicador (Vázquez et al., 2010). En este método, 0,1 mL de NaOH neutraliza 1 mg de ácido láctico, lo que equivale a 1 °D (1 °D = 0,1 g/L de ácido láctico o 0,01 %).

Para realizar la titulación se utilizaron 50 mL de lactosuero, los cuales fueron colocados en un vaso de precipitado. Posteriormente, se añadieron 2 a 3 gotas de fenolftaleína como indicador de pH. Por otro lado, se llenó una bureta con la solución de NaOH, previamente estandarizada. La solución de NaOH al 0,1 N se añadió lentamente a la muestra bajo agitación constante hasta observar un cambio de color, indicando el punto de equivalencia.

3.5 Porcentaje de grasa.

La medición del porcentaje de grasa se realizó empleando el método de Róse-Gottlieb, el cual es un estándar internacional en análisis fisicoquímicos para la determinación de grasa en productos lácteos (ISO, 2010). El método consiste en extraer y cuantificar la fracción lipídica mediante el uso de solventes orgánicos, permitiendo un análisis confiable incluso en matrices complejas como el lactosuero.

Para el procedimiento se tomó 10 mL de lactosuero a los cuales se les añadió 1,5 mL de amoníaco al 25% y 10 mL de alcohol etílico al 95%, esto con el fin de desnaturalizar las

proteínas y así facilitar la liberación de grasas al romper las interacciones proteína-lípido. Posteriormente, se añadieron 25 mL de éter etílico, el cual es un solvente que disuelve la grasa presente en la muestra. La mezcla se agitó y se dejó en reposo hasta lograr una clara separación de fases. La fase grasa, disuelta en el solvente, se separó y recolectó en un matraz, repitiendo el proceso dos veces más con la fase acuosa restante para maximizar la extracción. Luego, el solvente se eliminó por evaporación en una estufa a 105 °C durante 30 minutos. El residuo seco, que corresponde a la grasa extraída, se enfrió en un desecador y se procedió a pesar en una balanza analítica. Finalmente, el porcentaje de grasa se calculó empleando la relación entre la masa de grasa extraída y la masa de la muestra inicial, expresada en porcentaje (Masson, 2016).

3.6 Medición de densidad.

La densidad es una propiedad física fundamental que permite caracterizar el lactosuero al relacionar su masa con el volumen que ocupa. Este parámetro es relevante para evaluar su calidad, optimizar procesos de transporte y almacenamiento, y garantizar uniformidad en el desarrollo de productos derivados (Singh & Heldman, 2014).

Para determinar la densidad, se empleó un picnómetro calibrado con agua destilada a 20 °C, siguiendo procedimientos recomendados por la AOAC (2019). Inicialmente, el picnómetro fue llenado con lactosuero y se pesó en una balanza analítica. La densidad se calculó dividiendo la masa del lactosuero, obtenida por la diferencia entre el picnómetro lleno y vacío, por el volumen conocido del picnómetro.

3.7 Medición de lactosa.

La medición de lactosa se realizó utilizando el método fenol-ácido sulfúrico, desarrollado por DuBois et al. (1956), el cual es una técnica colorimétrica para la cuantificación de carbohidratos en soluciones acuosas. Este procedimiento aprovecha la reacción del ácido sulfúrico con los carbohidratos, que genera derivados de furfural o hidroximetilfurfural (HMF). La interacción de estos compuestos con fenol produce un complejo coloreado que se cuantifica mediante espectrofotometría a 490 nm, lo que garantiza sensibilidad y precisión en los resultados (DuBois et al., 1956; López Legarda et al., 2017).

Para la cuantificación de lactosa, se elaboró inicialmente una curva de calibración (Figura 2) a partir de una solución madre de lactosa a 100 mg/L, de la cual se prepararon diluciones sucesivas. Luego, se tomaron 2 mL de muestra y se añadieron 1 mL de solución de fenol al 5 % y 5 mL de ácido sulfúrico concentrado a cada una, asegurando una adición rápida y directa sobre la solución. Las muestras se dejaron reaccionar durante 10 minutos a temperatura ambiente, seguidos de una agitación vigorosa durante 30 segundos. Finalmente, se permitieron 20 minutos de reposo adicional antes de medir la absorbancia en un espectrofotómetro UV-Vis (modelo JASCO V-730) a 488,6 nm.

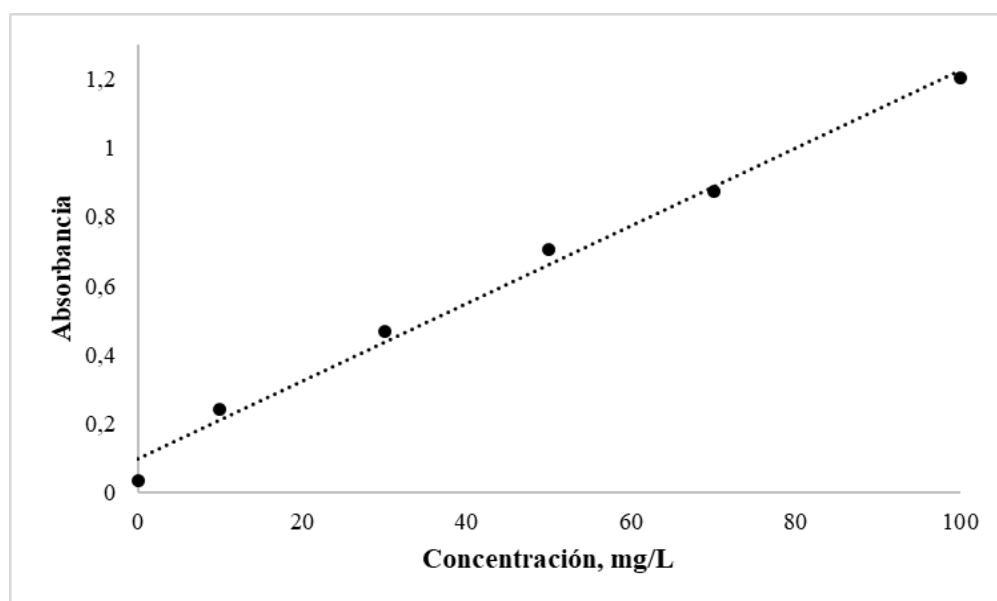


Figura 2. Curva de calibración de lactosa.

Las muestras de lactosuero se trataron siguiendo el mismo protocolo. A partir de la ecuación derivada de la curva de calibración (Ecuación 2), se determinó la concentración de lactosa en las muestras analizadas.

$$\text{Concentración (mg/L)} = \frac{\text{Absorbancia} - 0,0987}{0,0113} \quad \text{Ec (2)}$$

3.8 Sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos totales.

Los sólidos totales en el lactosuero representan un parámetro fundamental para evaluar su calidad y composición, puesto que estos reflejan la concentración de nutrientes esenciales

como proteínas, minerales y lactosa. Los sólidos disueltos totales (TDS) corresponden a los componentes solubles en agua, como minerales y lactosa, mientras que los sólidos suspendidos totales (SST) incluyen partículas no solubles, como proteínas y otros compuestos orgánicos.

Para determinar los sólidos totales se tomó una muestra de 100 mL de lactosuero, la cual fue filtrada para separar los sólidos suspendidos de los disueltos. La fracción filtrada (TDS) se llevó a una caja Petri y se sometió a evaporación a 105 °C durante 1 hora. Simultáneamente, el residuo retenido en el filtro (SST) fue secado en las mismas condiciones. Ambas fracciones se enfriaron en un desecador y se pesaron con una balanza analítica (Universitat Politècnica de València - UPV, 2021). La suma de los valores obtenidos para los TDS y los SST permitió calcular el porcentaje de sólidos totales en la muestra inicial.

3.9 Filtración por membrana.

Para realizar el proceso de filtración con membranas, se utilizó una celda de ultrafiltración del laboratorio del grupo de investigación en ciencias con aplicaciones tecnológicas. Esta fue equipada con una membrana de nitrato de celulosa de 0,2 µm. Las condiciones de operación se ajustaron según un diseño experimental aleatorio, que consistió en 27 corridas, variando tres niveles de presión (3, 3,5 y 4 bares) y tres niveles de tiempo (15, 20 y 30 minutos). En cada corrida, se cargaron 50 mL de lactosuero filtrado y centrifugado previamente. Seguidamente, se aplicó nitrógeno para generar la presión necesaria para el proceso de filtración. La muestra se filtró bajo las condiciones de presión y tiempo asignadas, y se mantuvo una agitación constante a 1.000 rpm (Figura 3). Finalmente, se recolectaron tanto el permeado como el retenido para su posterior análisis de proteínas y lactosa.



Figura 3. Montaje experimental en la celda de ultrafiltración.

Los datos obtenidos se utilizaron para evaluar la influencia de las variables de presión y tiempo en la concentración de proteína y rendimiento, calculados según las ecuaciones (3) y (4), respectivamente.

$$C_{\text{proteína}}(\%) = \frac{C_{\text{retenido}}}{C_{\text{inicial}}} * 100 \quad \text{Ec (3)}$$

$$\text{Rendimiento}(\%) = \frac{(C_{\text{retenido}} * V_{\text{retenido}})}{(C_{\text{inicial}} * V_{\text{inicial}})} * 100 \quad \text{Ec (4)}$$

Donde C representa la concentración y V el volumen, ya sea del retenido o de la carga inicial antes de la filtración. Al finalizar el proceso experimental, se llevó a cabo una limpieza detallada de la celda con HCl, asegurando la correcta conservación del equipo para futuras pruebas.

3.10 Secado por aspersión.

El estudio se llevó a cabo utilizando un secador por aspersión marca LabPlant SD en la sede Palmira de la Universidad del Valle. A partir de una revisión de la literatura, se determinaron las condiciones más adecuadas para el secado por aspersión orientado a la obtención de proteínas a partir del lactosuero. Por ejemplo, para definir la temperatura de entrada del aire, se consideró el estudio de Loachamin y Narváez (2021), quienes evaluaron la optimización del proceso de obtención y caracterización del suero de leche en polvo, empleando temperaturas entre 170 °C y 180 °C, las cuales demostraron ser un factor determinante en los resultados obtenidos. De manera similar, Solís, Solís, Teniza y Martínez (2024) utilizaron una temperatura de 200 °C en el proceso de secado por aspersión, con el propósito de reutilizar el

lactosuero como sustituto de la leche en la elaboración de queso Oaxaca y otros productos alimenticios.

Por otra parte, la variable de flujo fue seleccionada con base en experiencias previas de pulverización de leche realizadas utilizando el mismo equipo empleado en este proceso. Considerando que las propiedades físico-químicas del lactosuero presentan ciertas similitudes con las de la leche como la densidad y viscosidad, se consideró apropiado utilizar un rango de flujos similar. Teniendo en cuenta lo anterior, se estableció un diseño experimental bifactorial aleatorizado, considerando como variables independientes la temperatura de entrada del aire (170, 180 y 190 °C) y el flujo de alimentación del lactosuero al 15% (227 y 328 mL/h). Como variables de respuesta se evaluaron el porcentaje final de humedad del polvo obtenido y el rendimiento de sólidos. Cada combinación de factores se evaluó con tres réplicas para garantizar la confiabilidad de los resultados, totalizando 18 corridas.

Para realizar cada prueba, se preparó una solución de 100 mL, la mezcla fue homogeneizada con un equipo ultrasónico y luego filtrada para evitar la presencia de sólidos que pudieran causar incrustaciones en el equipo. Después de este proceso, la solución se llevó al sistema de secado. Antes de iniciar el proceso de secado, se mantuvo una presión constante de 0,25 bar, se calibraron los sensores de temperatura y flujo, y se precalentó el sistema hasta alcanzar las condiciones térmicas establecidas en cada tratamiento (Figura 4). El porcentaje de humedad se determinó mediante una balanza determinadora de humedad marca Axis ATS-BTS, mientras que el rendimiento de sólidos se calculó a partir de la ecuación 5.

$$\text{Rendimiento de sólidos} = \frac{m_{pf}}{m_i} * 100 \quad \text{Ec (5)}$$

Donde, m_{pf} es la masa de polvo recuperado y m_i la masa inicial de sólidos en la alimentación.



Figura 4. Montaje experimental del secado por aspersión.

3.11 Escalado.

En el proceso de escalado de la membrana de filtración y el secado por aspersión, se simularon datos experimentales obtenidos a nivel de laboratorio en el software SuperPro Designer® versión 14 (Intelligen Inc.), el cual permite simular operaciones unitarias a nivel industrial, integrando aspectos técnicos y económicos.

Para la etapa de filtración, se utilizó el módulo de microfiltración/ultrafiltración del programa donde se ingresaron los datos de presión de operación, tiempo de filtración, volumen de alimentación, área de membrana, flujo de permeado y factor de recuperación. La capacidad fue escalada a una producción diaria equivalente a 7.000 litros por día, definiendo ciclos de operación de 22 horas. En el secado por aspersión, se escalaron las variables como temperatura de entrada del aire, caudal de alimentación y porcentaje final de humedad del producto en polvo. Se seleccionó el módulo correspondiente a spray drying, ajustando el diseño del equipo al volumen diario procesado y especificando las condiciones térmicas.

Se realizó una simulación donde se incorporan ambas etapas en un mismo proceso continuo y otra donde solo se tiene en cuenta el secado por aspersión del lactosuero para evaluar la viabilidad de la obtención del concentrado proteico en polvo en comparación con la

obtención del lactosuero en polvo.

El análisis económico se realizó mediante el módulo integrado Cash Flow Analysis Model (Intelligen, Inc., n.d.), que evaluó la viabilidad financiera del proceso escalado. Se estimaron los costos de capital (CAPEX) incluyendo equipos (membrana, secador, bombas) y los costos operativos (OPEX) como energía, materias primas y mano de obra. Los indicadores de rentabilidad (VPN, TIR, período de retorno) se calcularon con base en proyecciones de producción y precios de mercado del lactosuero en polvo. El modelo incorpora escenarios de sensibilidad para analizar el impacto de fluctuaciones en costos de energía o demanda, garantizando robustez en las conclusiones financieras.

4.RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1 Caracterización y pretratamiento del lactosuero.

El pretratamiento permitió la remoción de sólidos de mayor tamaño y separación de las grasas, como se muestra en la Figura 5, reduciendo así el riesgo de colmatación de la membrana y mejorando la eficiencia de la separación.



Figura 5. *Residuo después del pretratamiento.*

Los resultados obtenidos de la caracterización antes de llevarlo a la membrana de filtración se muestran en la Tabla 2 junto a la comparación con los requisitos fisicoquímicos que establece la NTC 2997 para el lactosuero utilizado en la industria alimentaria.

Tabla 2. *Parámetros de caracterización del lactosuero.*

Parámetro	Valor	
	Lactosuero de la empresa "Alimentos La Cofradía"	Requerimiento de la NTC 2997 de 2007
Proteína, g/L	8,08	≥5
Lactosa, g/L	49,42	-
Sólidos Totales, g/L	82,01	60-90
pH	6,49	5,5-6,6
Densidad, g/mL	1,02	-
Acidez, °D	10	≤10
Grasa, %	0,52	≤ 1%

En los datos se puede observar que el lactosuero de la empresa "Alimentos La Cofradía" cumple con todos los requisitos de la NTC 2997 y, en comparación con los datos de la Tabla 1 ubicada en la sección de marco teórico, se podría clasificar como lactosuero dulce. Además, su pH de 6,49 lo rectifica como lactosuero dulce, lo que favorece su estabilidad en términos de solubilidad proteica, porque valores cercanos al punto isoelectrico de las proteínas (4,6) hacen que se pierda su solubilidad y que los flujos se vean afectados (Daufin y col, 1994); a la vez, también favorece su estabilidad fisicoquímica y calidad microbiológica debido a que en este pH se reduce el crecimiento de bacterias ácido-lácticas, que prosperan en ambientes más ácidos, y limita la proliferación de patógenos que prefieren pH más neutros.

Por otro lado, el contenido de sólidos totales del 8,2% es un valor superior al rango típico reportado para lactosuero dulce (6-7%), lo que puede atribuirse a varios factores. Entre ellos, la composición inicial de la leche, ya que, según Guo et al. (2007), una leche con mayor contenido de proteínas y grasa genera un lactosuero más concentrado. Así mismo, la variabilidad en los sólidos totales puede estar influenciada por la temperatura y el pH del proceso, los cuales afectan la solubilidad de las proteínas y la retención de minerales.

Además, también se observa un bajo contenido de grasa, lo cual reduce el riesgo de

obstrucción en las membranas y facilita el proceso de secado por aspersión, ya que un mayor porcentaje graso incrementa la viscosidad de la emulsión, dificultando la atomización y la formación homogénea de partículas (Segura Aliaga, 2020).

4.2 Filtración por membrana.

La Tabla 3 corresponde a los resultados obtenidos en esta sección.

Tabla 3. *Diseño experimental de membrana.*

Corrida	Presión, bar	Tiempo, min	Rendimiento, %	Concentración de la proteína, %
1	4	30	14	22
2	3,5	20	19	22
3	4	15	11	16
4	3,5	30	10	16
5	3	15	14	17
6	4	15	11	15
7	4	30	13	20
8	3,5	20	20	25
9	4	20	13	17
10	3	15	12	17
11	3,5	15	12	19
12	4	20	10	14
13	3	30	12	20
14	3	20	22	28
15	4	15	12	20
16	4	20	11	16
17	3,5	20	18	23
18	3,5	15	12	18
19	3	30	12	19
20	3,5	30	8	16
21	3	20	22	28

22	3	15	12	16
23	4	30	14	24
24	3,5	30	8	15
25	3	20	20	26
26	3,5	15	11	19
27	3	30	11	20

Los datos de la Tabla 3 fueron llevados al software estadístico Minitab para realizar un análisis de varianza; como resultado se obtuvo que el modelo para las variables de respuesta de rendimiento y concentración de proteína tiene un valor p de 0,000 en las variables de entrada de presión, tiempo y la interacción entre ambas, lo que significa que tienen un efecto significativo, es decir, que la variación de estos dos componentes influye en el rendimiento de separación de las proteínas y también en la concentración. Esto puede reafirmarse con el diagrama de Pareto de efectos estandarizados con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$ mostrado en las Figuras 6 y 7 puesto que en ambos diagramas se puede observar que los dos factores así como también la interacción entre ambos sobrepasan el umbral de significancia marcado con la línea roja punteada en 2,10.

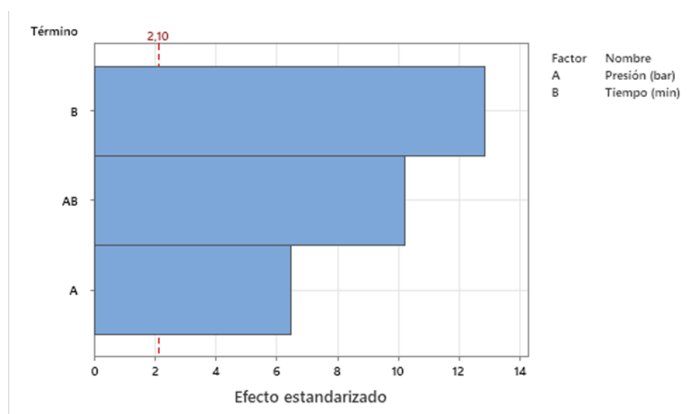


Figura 6. Diagrama de Pareto estandarizado de la variable de respuesta rendimiento.

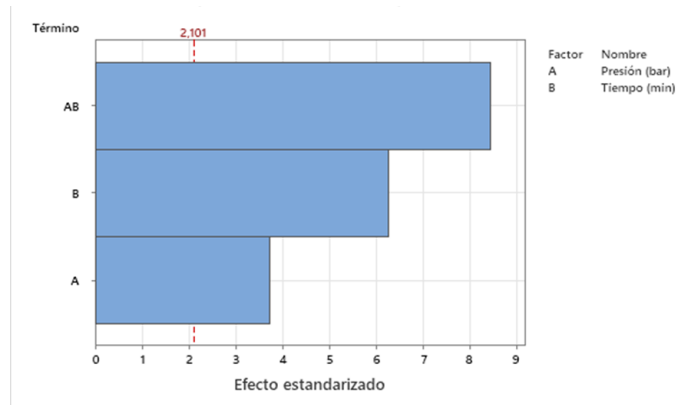


Figura 7. Diagrama de Pareto estandarizado de la variable de respuesta concentración de la proteína.

Sin embargo, las gráficas 6 y 7 muestran diferencias en el impacto relativo de los factores porque, en el rendimiento, el tiempo (B) es el factor más significativo, seguido por la interacción presión-tiempo (AB) y, en menor medida, la presión (A). En cambio, en la concentración de la proteína, la interacción AB tiene la mayor influencia, seguida del tiempo (B) y, con un impacto menor, la presión (A). Esto evidencia que, para optimizar la eficiencia del proceso de separación y maximizar la recuperación de la proteína, es fundamental ajustar estos parámetros de manera simultánea.

Por otro lado, el R^2 para el rendimiento es de 95,92% y para la concentración de 91,20%, lo que indica que los datos obtenidos en el diseño experimental muestran una tendencia bien definida. Como se observa en las Figuras 8 y 9, los residuos siguen una distribución normal con variaciones no significativas en ambos casos.

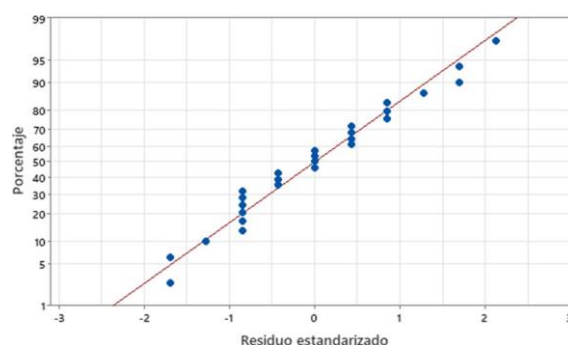


Figura 8. Gráfica de probabilidad normal de la variable de respuesta rendimiento.

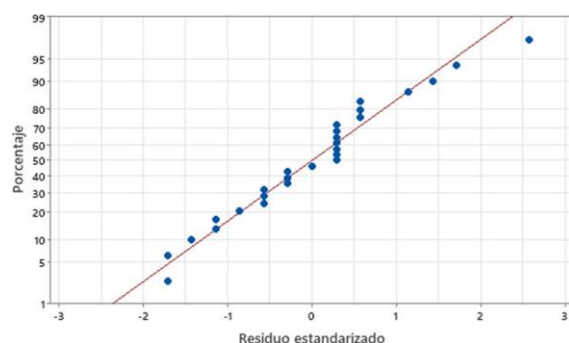


Figura 9. Gráfica de probabilidad normal de la variable de respuesta concentración de proteína.

Así, los resultados pueden generalizarse, aunque no se reducen los posibles errores de ajuste por variables no incluidas en el análisis, como el tamaño de poro de la membrana y el flujo de alimentación de lactosuero, ya que estos son factores clave en la eficiencia de la filtración, como lo demuestran estudios previos. Por ejemplo, Cheang y Zydney (2004) emplearon membranas de 30 y 100 kDa, logrando un rendimiento del 90% en la recuperación de proteínas. De manera similar, Flores Cadena y Llerena Oñate (2023) compararon tamaños de poro de 0,1 μm y 0,2 μm , concluyendo que la membrana de menor tamaño permitió una mayor concentración de proteínas. Asimismo, Cheryan (1998, Capítulos 4D-4E) analizó el impacto del flujo de alimentación en la formación de la capa de polarización y la acumulación de partículas sobre la membrana, concluyendo que este impacta directamente en la eficiencia del proceso y la vida útil de la membrana. Por otro lado, el flujo de alimentación es una variable dependiente de la presión, por lo que considerarlo como una variable independiente no sería significativo para reducir el error.

En el mismo contexto, Minitab mostró que una presión de 3,0 bar y tiempo de 20 minutos son los niveles que incrementan significativamente el rendimiento y concentración de las proteínas en comparación con los otros factores evaluados en este estudio. Esto se evidencia en las tres corridas correspondientes a estos niveles, presentadas en la Tabla 3, donde, en promedio, se obtuvo un rendimiento de separación de proteína del $21\% \pm 1\%$ y una concentración de proteína de $27\% \pm 1\%$.

Sin embargo, estos resultados reflejan una eficiencia moderada en el proceso de filtración, dado que investigaciones anteriores han reportado eficiencias superiores. Por ejemplo, Murcia Muñoz (2006) alcanzó un rendimiento de separación de proteínas del 97,9% al variar el flujo de alimentación y la presión transmembrana, mientras que Faría et al. (2003) lograron una concentración de proteínas del 51,84% utilizando una planta móvil de ultrafiltración y

nanofiltración con membranas en espiral de polisulfona y poliamida, concordando con la recomendación de Cheryan (1998), quien señala que, para aplicaciones lácteas, las membranas de poliamida o polietersulfona (PES) son preferibles debido a su mayor resistencia química y térmica, así como a su mejor tolerancia al pH.

Si bien en este estudio se utilizaron membranas de nitrato de celulosa debido a su disponibilidad en el mercado, alta capacidad de adsorción, naturaleza hidrófila y capacidad para manejar altos caudales, no son la opción más adecuada para la separación de proteínas, lo que podría explicar la eficiencia relativamente baja obtenida. Además, las discrepancias en los resultados también pueden atribuirse a diferencias en las condiciones operativas, como el tamaño de poro, la presión aplicada y el flujo de alimentación. Cabe mencionar que diversos autores, incluidos los ya mencionados y Cortez et al. (2021), sugieren que la recirculación del fluido en el sistema mejora significativamente la eficiencia del proceso.

Por otra parte, en la Figura 10 se muestra la evolución del flujo de permeado durante la filtración a 3 bar de presión y 20 minutos. El comportamiento mostrado es típico de los procesos de filtración por membrana y se atribuye principalmente a la polarización de la concentración y al ensuciamiento de la membrana (Ortiz Jerez et al., 2008) debido a la acumulación de partículas, proteínas y otros componentes del lactosuero en los poros de la membrana, lo cual hace que se incremente la resistencia a la permeabilidad, reduciendo el flujo de manera significativa.

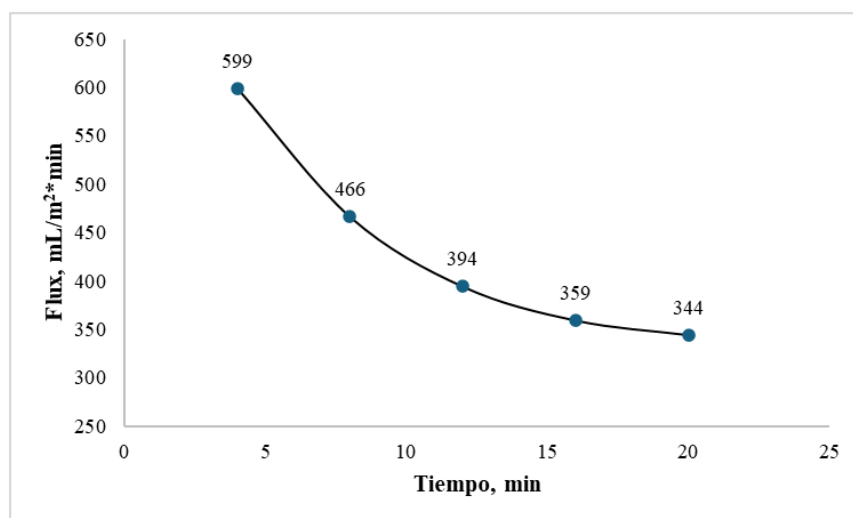


Figura 10. Comportamiento del flujo permeado en el tiempo.

En este caso, dicha disminución es más pronunciada en los primeros 16 minutos y se estabiliza gradualmente hacia el minuto 20, lo que sugiere que la membrana alcanza un estado de equilibrio en el que el ensuciamiento sigue ocurriendo, pero a una tasa más estable. Esto indica que 20 minutos es un tiempo de operación adecuado antes de que la pérdida de flujo afecte considerablemente la eficiencia del proceso.

4.3 Secado por aspersión.

Los resultados del secado por aspersión se muestran en la Tabla 4, la cual también fue llevada al software estadístico Minitab para realizar un análisis de varianza con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 4. *Diseño experimental secador por aspersión.*

Corrida	Temperatura, °C	Flujo, mL/h	Humedad final, %	Rendimiento de sólidos, %
1	190	328	10	71
2	180	328	11	70
3	170	227	8	39
4	180	328	11	67
5	190	227	8	61
6	180	328	12	67
7	170	328	10	63
8	170	328	11	63
9	190	328	11	71
10	170	328	12	67
11	170	227	10	40
12	190	227	10	60
13	180	227	8	63
14	180	227	8	60

15	180	227	8	63
16	190	328	10	69
17	190	227	10	61
18	170	227	8	39

El análisis de varianza para el porcentaje de humedad reveló que el flujo de alimentación fue el factor más significativo ($p < 0,001$), explicando el 75,32% de la variabilidad, mientras que la temperatura no tuvo un efecto significativo individual ($p = 0,926$), es decir, este factor no influye notablemente en la humedad residual, dentro del rango estudiado. Por su parte, las interacciones entre temperatura y flujo presentaron una tendencia marginal ($p = 0,097$), lo que sugiere que su efecto conjunto podría ser considerado en futuros análisis con mayor número de réplicas, dado que en la práctica se observó una ligera tendencia a mayor humedad con temperaturas bajas y flujo alto. Esto puede evidenciarse en la Figura 11, donde solo el factor B sobrepasa el umbral de significancia. Por el contrario, el rendimiento de sólidos presenta un R^2 del 98,58%, y se tiene que tanto la temperatura ($p < 0,0001$) como el flujo ($p < 0,0001$) y su interacción ($p < 0,0001$) influyen significativamente, como se muestra en la Figura 12.

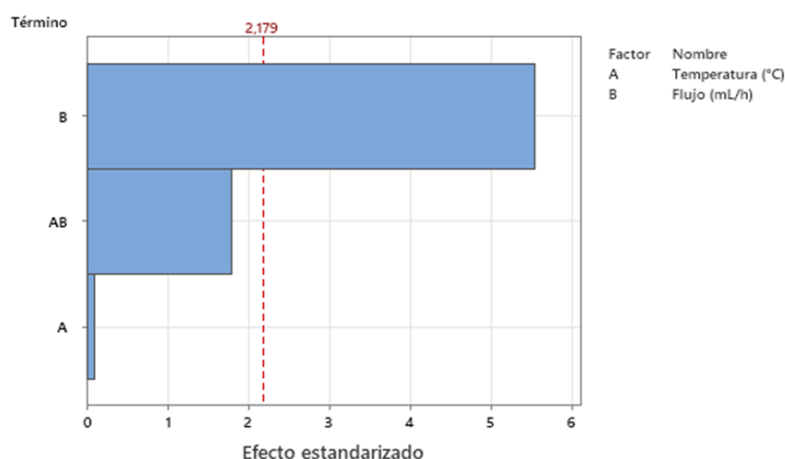


Figura 11. Diagrama de Pareto estandarizado de la variable humedad final, %.

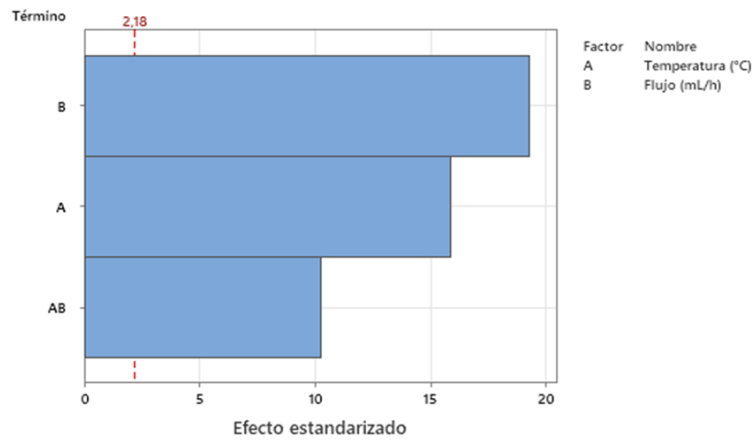


Figura 12. Diagrama de Pareto estandarizado de la variable Rendimiento de sólidos, %.

Para ambos casos, los gráficos de residuos (Figura 13 y 14) confirmaron la normalidad y homocedasticidad de los datos, validando el modelo.

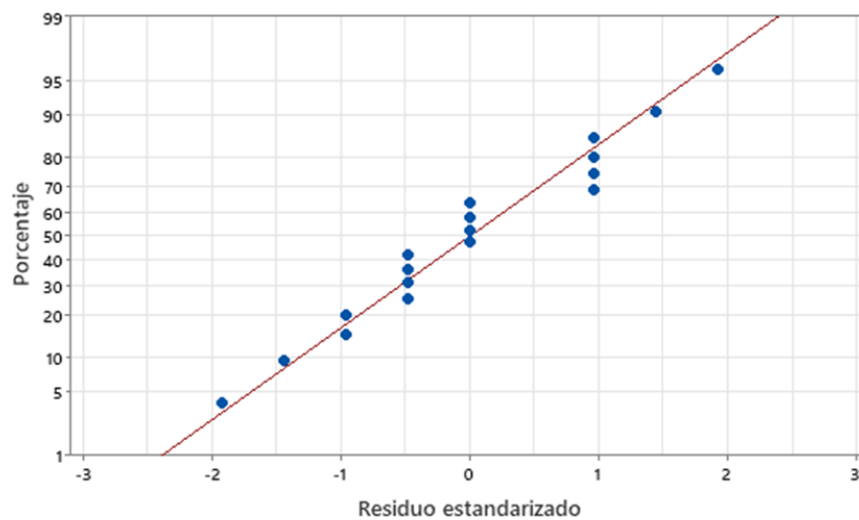


Figura 13. Gráfica de probabilidad normal de la variable de respuesta humedad.

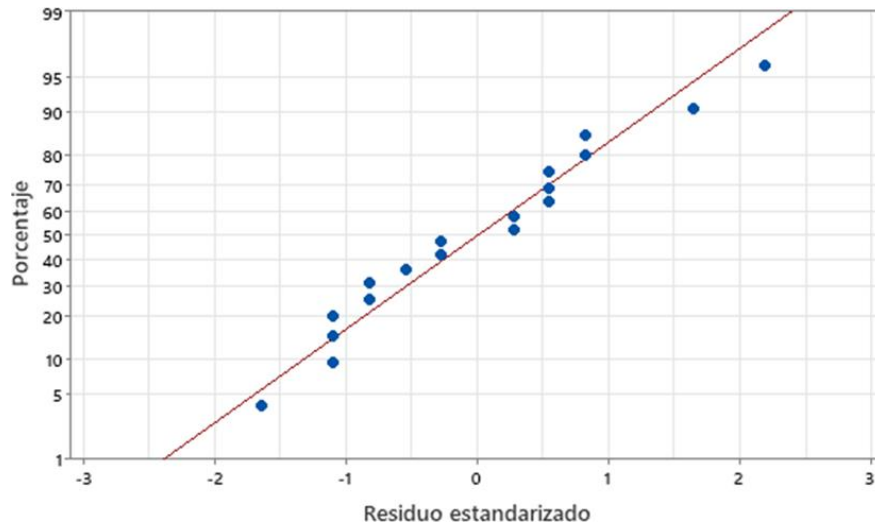


Figura 14. Gráfica de probabilidad normal de la variable de respuesta rendimiento de sólidos.

Los resultados indican que, para minimizar la humedad, el flujo bajo (227 mL/h) es óptimo, mientras que el rendimiento se maximiza con flujo alto (328 mL/h), esto concuerda con los estudios de Mouzai et al. (2023) quien menciona que la velocidad del flujo de alimentación es el principal parámetro que influye en las respuestas de humedad final puesto que los flujos más bajos permiten un mayor tiempo de residencia del material atomizado, mejorando la eficiencia de evaporación y reduciendo la humedad del polvo. No obstante, dado que la finalidad del proceso es obtener un polvo de lactosuero con baja humedad y alta recuperación de sólidos, las condiciones operacionales que mejor equilibran ambos objetivos, según la Tabla 4, corresponden a 180 °C de temperatura y 227 mL/h de flujo porque se presenta un 8% de humedad final y un 62% $\pm 1,5\%$ en promedio de rendimiento de sólidos (Figura 15). Por consiguiente, estas condiciones serán seleccionadas para llevar a cabo el proceso de escalado.

El valor alcanzado en esta investigación de rendimiento de sólidos (62 %) se ubica por encima del umbral mínimo recomendado según Rahman et al. (2024), quienes afirman que un valor superior al 50 % se considera indicativo de un desempeño aceptable, mientras que rendimientos bajos suelen asociarse con problemas de fluidez del polvo derivados de la pegajosidad del material durante el secado; esta situación es frecuente en matrices alimentarias con alto contenido de azúcares, como el lactosuero.

En este caso, se evidencia un funcionamiento adecuado del proceso bajo las condiciones empleadas. No obstante, también sugiere que aproximadamente el 38 % de los sólidos no

fueron recuperados, lo cual podría atribuirse a pérdidas por deposición en las paredes de la cámara de secado o por arrastre de partículas finas en el sistema de escape.

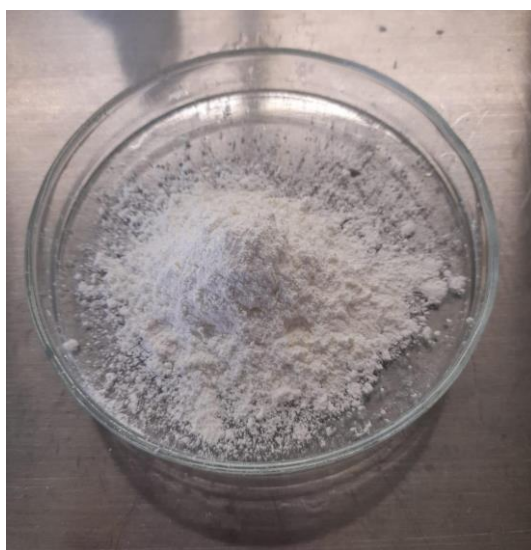


Figura 15. *Lactosuero en polvo a 180 °C y 227 mL/h..*

4.4 Escalado.

En el proceso de escalado los datos de simulados correspondientes a la sección de la filtración por membrana presentan una incertidumbre del 4,76% y 7,40% para el rendimiento y concentración de proteína, respectivamente. En cuanto al secador por aspersión se presenta una incertidumbre del rendimiento de sólidos del 6,44%.

Estas desviaciones pueden atribuirse tanto a errores sistemáticos y aleatorios durante las corridas experimentales, como a las simplificaciones propias del modelo matemático del simulador, que no siempre logra reproducir con exactitud el comportamiento real del sistema. En particular, en la etapa de filtración, la concentración de proteína resulta más sensible a pequeñas variaciones en el volumen, pérdidas en el sistema y exactitud del método de cuantificación, lo que explica su mayor nivel de incertidumbre frente al rendimiento de separación. En el caso del secado por aspersión, la incertidumbre del rendimiento de sólidos refleja la variabilidad inherente al escalado del proceso y los supuestos del modelo de simulación, que puede asumir condiciones ideales como una distribución uniforme de temperatura o un comportamiento homogéneo de las partículas, lo cual no se cumple completamente en condiciones reales.

4.4.1 Escalado para la obtención de proteína de lactosuero en polvo.

El escalado del proceso para la operación de la membrana y el secador por aspersión, considerando una capacidad de 7.000 L/día, se presenta en la Tabla 5, donde se detallan las condiciones y parámetros de operación de la membrana. A continuación, en la Tabla 6 se muestran los datos correspondientes al secador por aspersión. Como resultado del proceso, se obtiene una producción de 382,7 kg por batch de proteína de lactosuero en polvo concentrada al 27%.

Tabla 5. Especificaciones de la membrana.

Capacidad, L/día	7.000
Área, m²	224
Volumen permeado, L	1.540
Volumen retenido, L	5.460
Temperatura, °C	27
Presión, bar	3
Tiempo de operación, h	22
Agitación, rpm	1.000
Tamaño de poro, micras	0,2
Material membrana	Nitrato de celulosa
Material equipo	Acero inoxidable 304
Costo del equipo, \$COP	15.500.000

Tabla 6. Especificaciones del secador por aspersión.

Capacidad, L/día	5.500
Diámetro, m	0,8
Altura, m	2,3
Volumen, L	1.015

Material equipo	Acero inoxidable 304
Presión, bar	0,25
Temperatura de aire a la entrada, °C	180
Temperatura de aire a la salida, °C	105
Temperatura de LS a la entrada, °C	27
Temperatura de LS a la salida, °C	70
Tiempo, h	6
Cantidad de LS obtenida, kg batch	382,7
Costo del equipo, \$COP	1.103.206.000

Una vez halladas las especificaciones se obtuvo el análisis económico, el cual se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Resumen ejecutivo (precios abril 2025).

Inversión de Capital Total	\$9.933.290.000
Costo Operativo/año	\$11.003.660.000
Ingresos/año	\$11.810.550.000
Tamaño del Lote, kg batch	382,7
Tasa Anual de Costos Base, kg batch/año	131.649
Costo Unitario de Producción	\$83.637
Ingresos Unitarios de Producción	\$89.670
Margen Bruto	6,75%
Retorno sobre la Inversión (ROI)	14,38%
Tiempo de Recuperación, año	6,96
Tasa Interna de Retorno (TIR) después de impuestos	1,98%
Valor Presente Neto a 7,0 % de interés	- \$3.951.020.000

Bajo las condiciones actuales, el proyecto no es financieramente viable. A pesar de que los ingresos anuales estimados alcanzan los 11.810.550.000 \$COP, el alto costo operativo de 11.003.660.000 \$COP/año y una inversión de capital de 9.933.290.000 \$COP generan un Valor Presente Neto negativo de -3.951.020.000 \$COP, lo que indica una pérdida económica al evaluar los flujos de caja en el tiempo. Además, la Tasa Interna de Retorno es de 1,98 %, un valor considerablemente inferior a la tasa mínima esperada del 7 %, lo cual confirma que el rendimiento del proyecto está por debajo del costo de oportunidad del capital. El tiempo estimado para recuperar la inversión inicial (payback) es de 6,96 años, superando los 5 años que generalmente son aceptados como límite en las industrias para considerar un proyecto atractivo.

Estos indicadores, junto con un margen bruto bajo del 6,75 %, evidencian que el modelo económico actual no genera un retorno atractivo ni cubre adecuadamente el costo del capital invertido.

4.4.2 Escalado para la obtención de lactosuero en polvo.

La Tabla 8 muestra el escalado del proceso de secado por aspersión. En ella se especifican los parámetros y datos operativos del secador por aspersión. Como resultado de este proceso, se obtiene una producción de 1.138,47 kg de lactosuero en polvo.

Tabla 8. *Especificaciones del secador por aspersión para lactosuero en polvo.*

Capacidad, L/día	7.000
Diámetro, m	0,82
Altura, m	2,5
Volumen, L	1.281,7
Material equipo	Acero inoxidable 304
Presión, bar	0,25
Temperatura de aire a la entrada, °C	180
Temperatura de aire a la salida, °C	105
Temperatura de LS a la entrada, °C	25
Temperatura de LS a la salida, °C	70

Tiempo, h	22
Cantidad de LS obtenida, kg batch	1.138,47
Costo del equipo, \$COP	900.970.000

De manera similar, se realizó el análisis económico, el cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9. *Resumen ejecutivo de lactosuero en polvo (precios abril 2025).*

Inversión de Capital Total	\$7.984.900.000
Costo Operativo/año	\$9.116.450.000
Ingresos/año	\$13.634.110.000
Tamaño del Lote, kg batch	1138,47
Tasa Anual de Costos Base, kg batch/año	375.694
Costo Unitario de Producción	\$24.253,6
Ingresos Unitarios de Producción	\$36.300
Margen Bruto	33,13%
Retorno sobre la Inversión (ROI)	50,78%
Tiempo de Recuperación, año	1,97
Tasa Interna de Retorno (TIR) después de impuestos	28,44%
Valor Presente Neto a 7,0 % de interés	\$18.062.100.000

Estos valores indican que el proceso tiene una operación económicamente viable, dado que los ingresos superan ampliamente los costos operativos. La rentabilidad se ve respaldada por un margen bruto del 33,13% y un retorno sobre la inversión (ROI) del 50,78%, lo cual sugiere que, por cada peso invertido, se obtiene un retorno de más de la mitad de la inversión inicial, haciendo atractivo el proyecto desde el punto de vista financiero.

Además, el proyecto muestra indicadores financieros positivos a largo plazo, con un valor presente neto de \$18.062.100.000 COP a una tasa de interés del 7%, lo cual significa que hay una generación de valor significativa por encima de la inversión inicial. La tasa interna de retorno después de impuestos es del 28,44%, lo cual refuerza la viabilidad económica del

proyecto. Asimismo, el tiempo de recuperación de la inversión es de 1,97 años, lo que implica una rápida recuperación del capital invertido, aumentando la confianza y la solidez del proyecto.

4.5 Caracterización final.

Finalmente, en la Tabla 10 se presentan los resultados de la caracterización final para ambos procesos. El análisis del lactosuero evidencia que tanto el concentrado proteico al 27% como el lactosuero en polvo cumplen con los requisitos establecidos por la NTC 2997 (2007), superando el contenido mínimo de proteína, manteniendo los niveles de pH y grasa dentro de los límites permitidos y ajustándose al rango adecuado de sólidos totales. No obstante, se observa que la acidez alcanza el límite máximo permitido, lo cual indica la necesidad de implementar un control más riguroso del proceso para prevenir aumentos de acidez o microorganismos durante el almacenamiento.

Tabla 10. Caracterización final.

Parámetro	Valor		
	Concentrado proteico de lactosuero al 27% en polvo		Requerimiento de la NTC 2997 de 2007
	Lactosuero en polvo		
Proteína, g/L	10,26	9	≥5
Lactosa, g/L	51,65	50,3	-
Sólidos Totales, g/L	83,4	81	60-90
pH	6	5,7	5,5-6,6
Acidez, °D	10	10	≤10
Grasa, %	0,5	0,3	≤ 1%

5. CONCLUSIONES.

El pretratamiento del lactosuero de "Alimentos La Cofradía" fue clave para optimizar el proceso de filtración, al reducir el riesgo de obstrucción de las membranas y favorecer una

separación más eficiente. La caracterización del lactosuero confirmó su clasificación como dulce según la NTC 2997, destacándose por un pH que promueve la estabilidad proteica y un contenido de sólidos totales superior al habitual. Estos factores evidencian que el lactosuero tratado posee características adecuadas para su aprovechamiento industrial, especialmente en procesos de concentración de proteínas, siempre que se aplique un pretratamiento adecuado.

El estudio demuestra que la presión, el tiempo y su interacción influyen significativamente en el rendimiento del proceso de filtración por membrana. Si bien se identificaron condiciones operativas óptimas (3 bar y 20 minutos) que ofrecen una eficiencia moderada del 27% de concentración de la proteína, se sugiere que el uso de membranas más adecuadas como las de poliamida o polietersulfona podrían mejorar los resultados. A pesar de las incertidumbres evidenciadas en la simulación, los datos obtenidos permiten un dimensionamiento preliminar del sistema para una escala de producción de 7.000 L/día en la empresa “Alimentos La Cofradía”.

En el secado por aspersión, los resultados obtenidos confirman que el flujo de alimentación es el principal factor que afecta la humedad residual, mientras que la temperatura no mostró un efecto significativo sobre esta variable. Sin embargo, ambos factores y su interacción influyen de manera relevante en el rendimiento de sólidos. Las condiciones óptimas determinadas, 180 °C y 227 mL/h, permiten obtener un polvo de lactosuero con baja humedad (8%) y un rendimiento adecuado (62%), estableciendo una base sólida para el escalado del proceso y su futura aplicación a nivel industrial.

El escalado del proceso que integra la operación de membrana con el secador por aspersión, diseñado para una capacidad de 7000 L/día y una producción de 382,7 kg por batch de proteína de lactosuero en polvo, no resulta viable desde el punto de vista financiero, ya que los ingresos estimados de 11.810.550.000 \$COP no logran cubrir los altos costos operativos (11.003.660.000 \$COP) ni la inversión inicial requerida (9.933.290.000 \$COP). En contraste, el escalado del proceso únicamente con el secado por aspersión refleja una alternativa técnica y económicamente favorable, con una producción de 1.138,47 kg de lactosuero en polvo. Los resultados financieros, incluyendo una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 28,44%, confirman la capacidad del proyecto para generar valor y cumplir con un propósito de sostenibilidad, al transformar un residuo contaminante en un producto con valor agregado.

6. RECOMENDACIONES.

- Para un análisis complementario, se sugiere evaluar la composición microbiológica del lactosuero, así como la presencia de minerales o metales pesados, especialmente si el producto final se destina a sectores como la industria alimentaria.
- Se recomienda implementar un sistema de recirculación del lactosuero en futuros casos donde se busque concentrar la proteína del suero mediante filtración por membrana. La recirculación del fluido puede mejorar significativamente la eficiencia del proceso de concentración, al permitir que el lactosuero pase varias veces a través de la membrana.
- Se recomienda incluir variables como el tamaño de poro de la membrana en futuros experimentos, ya que un tamaño de poro adecuado puede tener un impacto significativo en la polarización de la membrana que ocurre cuando las partículas, como proteínas y otros componentes del lactosuero, se acumulan en la superficie de la membrana, lo que aumenta la resistencia al flujo de permeado y reduce la eficiencia del proceso.
- Es fundamental operar en el equipo de secado con una temperatura de entrada y un flujo de alimentación adecuados al proceso para evitar inundaciones en el secador, las cuales ocurren cuando el líquido no se evapora completamente y se acumula dentro de la cámara de secado. Esta acumulación puede provocar interrupciones en la operación, pérdida de producto, formación de incrustaciones y, en casos más severos, daños al equipo. Por lo tanto, se sugiere solamente usar el equipo para la función que ha sido diseñado.
- Para llevar a cabo el escalado del proceso, es fundamental realizar un análisis detallado de la composición fisicoquímica del lactosuero, con el fin de seleccionar adecuadamente los materiales de fabricación del equipo y así evitar problemas de corrosión a largo plazo.

7. REFERENCIAS.

- Adco Chura, W. (2018). *Propuesta de un sistema de secado por atomización para la obtención de polvo de grenetina*.
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSA_6049b9a5fb7b829c5940e9bc6ff93662/Details
- adminCVN. (2018, 22 octubre). La industria láctea en Colombia, importaciones y exportaciones. CVN. <https://cvn.com.co/industria-lactea/>
- Agudelo, G. (2022, 12 mayo). Secador por aspersión | Spray Dryver :Características. *Intek Group*. <https://intekgroup.com.co/secador-por-aspersion-o-spray-dryer/>
- Álvarez, P. (2020). Cuantificación espectrofotométrica de proteínas. *Universidad Santo Tomás*.
https://www.academia.edu/42973602/Cuantificaci%C3%B3n_espectrofotom%C3%A9trica_de_prote%C3%ADnas.
- Antury Devia, J. F., & Cubillos Oñate, A. C. (2016). *Diseño e implementación de un secador tipo spray-dryer para la pulverización de hidrolizados de maltodextrinas y glucosa producidos a partir de almidón de yuca*. [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].
<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/2f4b6113-f8bc-46b4-a15c-44d49f844014/content>
- AOAC International. (2019). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (21st ed.). Rockville, MD: AOAC International.
- Banjare, I. S., Gandhi, K., Sao, K., & Sharma, R. (2019). Spray-dried whey protein concentrate-iron complex: Preparation and physicochemical characterization. *Food technology and biotechnology*, 57(3), 331–340.
<https://doi.org/10.17113/ftb.57.03.19.6228>

- Bastian, E., Collinge, S., & Ernstrom, C. (1991). Ultrafiltration: Partitioning of Milk Constituents into Permeate and Retentate. *Journal Of Dairy Science*, 74(8), 2423-2434. [https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(91\)78417-8](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(91)78417-8)
- Bejarano Toro, E., Sepúlveda Valencia, J. U., & Rodriguez Sandoval, E. (2022). Use of ultrafiltration technology to concentrate whey proteins after white cheese manufacturing. *Revista Facultad Nacional De Agronomía Medellín*, 75(2). <https://doi.org/10.15446/rfnam.v75n2.98600>
- Bhattacharjee, S., Bhattacharjee, C., & Datta, S. (2006). Studies on the fractionation of β -lactoglobulin from casein whey using ultrafiltration and ion-exchange membrane chromatography. *Journal Of Membrane Science*, 275(1-2), 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.09.013>
- Carter, B., Cheng, N., Kapoor, R., Meletharayil, G., & Drake, M. (2021). Invited review: microfiltration-derived casein and whey protein from milk. *Journal of membrane science*, 104 (3), 2465-2479. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030221000126>
- Cheang, B., & Zydney, A. L. (2004). A two-stage ultrafiltration process for fractionation of whey protein isolate. *Journal Of Membrane Science*, 231(1), 159-167. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0376738803005970?via%3Dihub>
- Cheryan, M. (1998). *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook* (2.^a ed.). CRC Press. https://www.routledge.com/Ultrafiltration-and-Microfiltration-Handbook/Cheryan/p/book/9781566765985?srsId=AfmBOopG_nr0bZ27elmuXMk3QlWarJsBFukczNkeZ-BtJL1NWEFl7Cby
- Cortez, M. P., Gallardo, C. G., Brito, G. M., Sinchiguano, E. B., & Feijo, M. C. (2021). Ultrafiltración tangencial de lactosuero de queso fresco pasteurizado. *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5514361>

- Daufin, G., Labbe, J. P., Quemerais, A., Michel, F., & Merin, U. (1994). Optimizing clarified whey ultrafiltration: influence of pH. *Journal of Dairy Research*, 61(3), 355. <https://doi.org/10.1017/S0022029900030776>
- De Carvalho, A. F., & Maubois, L. (2010). *Engineering Aspects of Milk and Dairy Products* (1.^a ed.).
- DuBois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, F. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Faría, J., García, A., & García, A. (2003). Eficiencia en la concentración de la proteína de lactosuero con una planta móvil de ultrafiltración y nanofiltración. *Revista Científica FCV-LUZ*, 13(5), 347-351. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/cientifica/article/view/14997>
- Fauquant, J., Vieco, E., Brule, G., & Maubois, J. (1985). Clarification des lactosérums doux par aggrégation thermocalcique de la matière grasse résiduelle. *Dairy Science & Technology*, 65(647-648), 1-20. <https://doi.org/10.1051/lait:1985647-6481>
- Filková, I. Huang, L., Mujumdar, A. (2006). Industrial Spray Dryer. In: Handbook of Industrial Drying. Mujumdar, A. Ed. CRS Press. Taylor and Francis Group. pp 215-255.
- Flores Cadena, C. A., & Llerena Oñate, K. P. (2023). Aprovechamiento del suero de la mantequilla para la elaboración de una bebida mediante microfiltración tangencial. *Revista Científica Arbitrada Multidisciplinaria PENTACIENCIAS*, 5(4), 368-380. <https://editorialalema.org/index.php/pentaciencias/article/view/673>
- Ganadero, C. (2023, 1 marzo). *Conozca cuáles fueron los ingresos de las empresas de lácteos en 2018 y 2019*. CONtexto Ganadero. <https://www.contextoganadero.com/economia/conozca-cuales-fueron-los-ingresos-de-las-empresas-de-lacteos-en-2018-y-2019>

- Geankoplis, C. J. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles: (includes Unit Operations)* (4.^a ed.). Prentice Hall Professional Technical Reference.
- Griep, E. R., Cheng, Y., & Moraru, C. I. (2018). Efficient removal of spores from skim milk using cold microfiltration: Spore size and surface property considerations. *Journal Of Dairy Science*, 101(11), 9703-9713. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14888>
- Guo, H. Y., Pang, K., Zhang, X. Y., Zhao, L., Chen, S. W., Dong, M. L., & Ren, F. Z. (2007). Composition, Physiochemical Properties, Nitrogen Fraction Distribution, and Amino Acid Profile of Donkey Milk. *Journal Of Dairy Science*, 90(4). [https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(07\)71649-1/fulltext](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(07)71649-1/fulltext)
- Guerrero Rodríguez W., Gómez Aldapa C. A., González Rodríguez C. A., Castro-Rosas, J. (2009). Lactosuero y su problemática en el medio ambiente. Memorias del XI Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Monterrey, México.
- Ibáñez Lorente, R. (2007). *Estudio de la Ultrafiltración de Proteínas Modelo con Membranas Cerámicas* [Tesis doctoral, Universidad de Granada]. <https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/1534/16712183.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Imbera, S. (2019, 16 abril). *Temperaturas idóneas de refrigeración para la conservación de lácteos*. Imbera. Recuperado 25 de marzo de 2024, de <https://blog.imberacooling.com/temperaturas-idoneas-de-refrigeracion-para-la-conservacion-de-lacteos#:~:text=Para%20para%20conservar%20y%20prevenir,%C2%B0%20y%205%C2%B0C>.
- International Organization for Standardization (ISO). (2010). *Milk and milk products – Determination of fat content – Róse-Gottlieb gravimetric method (ISO 1211:2010)*.
- Intelligen, Inc., (n.d). *Intelligen – Process simulation software*. <https://www.intelligen.com/company-info/>

- Karleskind, D., Laye, I., Mei, F., & Morr, C. (1995). Chemical Pretreatment and Microfiltration for Making Delipidized Whey Protein Concentrate. *Journal Of Food Science*, 60(2), 221-226. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1995.tb05642.x>
- Lipnizki, F. (2010). Cross-Flow Membrane Applications in the Food Industry. *Membrane Technology: Membranes for Food Applications*, vol 3, 1-24. <https://doi.org/10.1002/9783527631384.ch1>
- Loachamin Guallichico,B & Narvaez Llulluna, Fulvio. (2021). OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SUERO DE LECHE EN POLVO A PARTIR DE LACTOSUERO DE LA EMPRESA (PROLAD´S) MEDIANTE EL MÉTODO DE SECADO POR ASPERSIÓN (Spray Dryer). Univerisdad técnica de Cotopaxi. Latacunga, Ecuador.
- López Legarda, X., Taramuel Gallardo, A., Arboleda Echavarría, C., Segura Sánchez, F., & Restrepo Betancur, L. F. (2017). Comparación de métodos que utilizan ácido sulfúrico para la determinación de azúcares totales. *Revista Cubana de Química*, 29(2), e-ISSN: 2224-5421.
- Masson, L. (2016, 1 junio). *Determinación de Grasa Total, Ácidos Grasos, Colesterol*. [Diapositivas]. SEMINARIO «METODOLOGÍAS ANALÍTICAS APLICABLES AL ETIQUETADO NUTRICIONAL» «ACHIPIA», Santiago, Chile. Universidad de Chile. <https://www.achipia.gob.cl/wp-content/uploads/2016/06/7-M--todos-Grasa-Total---c.-Grasos-Colesterol-Dra.-Lilia-Masson.pdf>
- Mazorra-Manzano, M. Á., & Moreno-Hernández, J. M. (2019). Propiedades y opciones para valorizar el lactosuero de la quesería artesanal. *CienciaUAT*, 14(1), 133. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v14i1.1134>
- Mincomercio. (s. f.). *1a Presentación pública - Ruta de Lácteos de Nariño* [Diapositivas]. Scribd. <https://es.scribd.com/document/727483522/1a-Presentacio-n-Pu-blica-Narin-o-3>

- Miwa, A. C. P., De Falco, P. B., & Calijuri, M. D. C. (2008). Avaliação de métodos espectrofotométricos para determinação de proteína em amostras de lagoas de estabilização. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 13(2), 236-242. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522008000200014>
- Mondragon, R., Juliá Bolívar, J. E., Barba, J. A., & Jarque Fonfría, J. C. (2013). El proceso de secado por atomización: formación de gránulos y cinética de secado de gotas. *Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(4), 0366-3175; 2173-0431. <https://doi.org/10.3989/cyv.212013>
- Monroy Pedraza, N. (2020). Propuesta preliminar de diseño para un sistema de separación de proteínas del lactosuero usando ultrafiltración. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_alimentos/721
- Mouzai, A., Kheroufi, A., Afoutni, L., Louaer, W., Zidoune, M., & Boughellout, H. (2023). Optimisation of spray drying parameters using mixed flow in whey powder production using response surface methodology (RSM). *Acta Alimentaria*, 52(2), 220-234. <https://doi.org/10.1556/066.2022.00258>
- Murcia Muñoz, F. (2006). *Evaluación técnica de la concentración de proteínas de lactosuero por ultrafiltración* [Trabajo fin de grado en Ingeniería Química]. Universidad del Valle.
- Naula Sáez, Jorge Rolando. (2017). Diseño de un proceso para la obtención de proteína del lactosuero mediante la operación unitaria de secado por atomización. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba.
- Ortiz Jerez, M. J., Vélez Pasos, C. A., & Franco Mejía, E. (2008). Modelos matemáticos de la colmatación de membranas en microfiltración tangencial. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 28(1), 123-132. <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v28n1/v28n1a13.pdf>
- Parra, R. A. (2009). Lactosuero: Importancia en la industria de alimentos. (2009). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 62(1), 4967-4982.

- Poveda, E. (2013). Suero lácteo, generalidades y potencial uso como fuente de calcio de alta biodisponibilidad. *Revista Chilena de Nutrición*, 40(4), 397-403. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182013000400011>
- Prabhuzantye, T., Khaire, R. A., & Gogate, P. R. (2019). Enhancing the recovery of whey proteins based on application of ultrasound in ultrafiltration and spray drying. *Ultrasonics Sonochemistry*, 55, 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.008>
- Rahman, N. F. N. N. A., Zubairi, S. I., Hashim, H., & Yaakob, H. (2024). Revolutionizing Spray Drying: An In-Depth Analysis of Surface Stickiness Trends and the Role of Physicochemical Innovations in Boosting Productivity. *Journal Of Food Quality*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/8929464>
- Ramírez, J. S., Solís, C. A., & Vélez, C.A. (2016). Tecnología de membranas: desarrollo histórico. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 19(1), 89-98. ISSN 1909-8367.
- Ramírez, J. S., Solís, C. A., & Vélez, C.A. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 11(22), 26-36. ISSN 1909-8367.
- Ramírez, J. S., Solís, C. A., & Vélez, C.A. (2018). Tecnología de membranas: Obtención de proteínas de lactosuero. *Entre Ciencia E Ingeniería*, 12(24), ISSN 2539-4169. <https://doi.org/10.31908/19098367.3815>
- RESOLUCIÓN 2997 DE 2007. (2007). *Ministerio de la Protección Social*. https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/RESOLUCI%C3%93N%202997%20DE%202007.pdf
- Rosenberg, M. (1995). Current and future applications for membrane processes in the dairy industry. *Trends In Food Science & Technology*, 6(1), 12-19. [https://doi.org/10.1016/s0924-2244\(00\)88912-8](https://doi.org/10.1016/s0924-2244(00)88912-8)

- Saboya, L., & Maubois, J. (2000). Current developments of microfiltration technology in the dairy industry. *Dairy Science & Technology*, 80(6), 541-553. <https://doi.org/10.1051/lait:2000144>
- Salazar, C. (2023, 6 octubre). Ministerio de Salud ordenó al Invima identificar empresas que estén rindiendo leche con lactosuero. *Infobae*. <https://www.infobae.com/colombia/2023/10/06/ministerio-de-salud-ordeno-al-invima-identificar-empresas-que-esten-rindiendo-leche-con-lactosuero/>
- Schroën, K., Van Dinther, A., Kassa, S., Vollebregt, H., Brans, G., & Boom, R. (2010). Membrane Processes for Dairy Fractionation. *Membrane Technology: Membranes for Food Applications*, 3, 25-43. <https://doi.org/10.1002/9783527631384.ch2>
- Segura Aliaga, J. M. (2020). *Microencapsulación de leche mediante secado por atomización a baja temperatura*. [TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA]. <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/a291507c-7f47-4e9c-807a-810ee3f3e49f/content>
- Singh, R., & Heldman, D. R. (2014). *Introduction to Food Engineering* (5th ed.). Academic Press.
- Solís Oba, A., Solís Oba, M.M., Teniza García, O., & Martínez Casares, R.M.. (2023). Propuesta para el aprovechamiento industrial del lactosuero. *Revista bio ciencias*, 10, e1392. Epub 22 de febrero de 2024. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-33802023000100404&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Superintendencia de Industria y Comercio. (2021). ESTUDIOS ECONÓMICOS SECTORIALES: Análisis del Sector Lácteo en Colombia: Evidencia para el periodo 2010-2020. Grupo de Estudios Económicos N° 34. https://www.sic.gov.co/sites/default/files/documentos/032022/ES-SLC_Version-publica.pdf

- Tovar Jimenez, X., Arana, A., Tellez, A., Muro Urista, C., & Abreu, A. (2012). Traditional Methods for Whey Protein Isolation and Concentration: Effects on Nutritional Properties and Biological Activity. *Journal Of The Mexican Chemical Society*, 56(4), ISSN 1870-249X. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v56i4.246>
- Tsakali, E., Petrotos, K., D'Alessandro, A. G., Mantas, C., Tripolitsiotis, I., Goulas, P., Chatzilazarou, A., & van Impe, J. F. (2015). Exploring the effect of ultrafiltration/diafiltration processing conditions on the lactoferrin and immunoglobulin G content of feta whey protein concentrates. *Journal of Food Process Engineering*, 38(4), 363–373. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12167>
- Universidad Nacional de Colombia. (2020). Lactosuero, con alto potencial para producir biopolímeros. *Agencia UNAL*. <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/lactosuero-con-alto-potencial-para-producir-biopolimeros>
- Universitat Politècnica de València - UPV. (2021, 4 noviembre). *Sólidos suspendidos totales y Sólidos disueltos totales. Procedimiento de medida* | | UPV [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=UUvkktdlIQ>
- Vázquez F, Villegas G, & Mosqueda P. (2010). Precipitación de proteínas lactoséricas en función de la acidez, temperatura y tiempo, de suero producido en Comonfort, Guanajuato, México. *Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1 (2), 157-169.
- Vega, J. (2018, 30 mayo). La industria del sector lácteo aporta 24,3% del Producto Interno Bruto agropecuario. *Diario la República*. <https://www.larepublica.co/economia/la-industria-del-sector-lacteo-aporta-24-3-del-producto-interno-bruto-agropecuario-2733713#:~:text=Como%20parte%20del%20reconocimiento%20de,23%25%20del%20PIB%20total%20nacional>.
- Zambrano, M. B. W., & Rivadeneira, A. D. (2021). *Alternativas para el aprovechamiento del lactosuero: Antecedentes investigativos y usos tradicionales*. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8232844>

8. ANEXOS.

Anexo A. *Simulación en Super Pro Designer para la obtención de concentrado de proteína en polvo al 27%.*

Anexo B. *Simulación en Super Pro Designer para la obtención de lactosuero en polvo.*