

DESARROLLO DE BIOFIBRAS SOSTENIBLES A PARTIR DE CASEÍNA DE LECHE: INNOVACIÓN Y APLICACIONES EN LA INDUSTRIA TEXTIL MEDIANTE PROCESOS FISICOQUÍMICOS

Development of sustainable biofibers from milk casein: innovation and applications in the textile industry through physicochemical processes

 ¹ Llano Daliz *
 ² Manobanda Paúl
 ³ Cázar Robert
 ³ Parada Mabel

¹ Investigador Independiente, Latacunga, Ecuador.

² Universidad Estatal Amazónica, Facultad de Ciencias de la Vida,
Puyo, Ecuador.

³ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Riobamba, Ecuador.

* daliz26llano@gmail.com

RESUMEN

La indagación analiza una opción sostenible a los textiles convencionales, proponiendo el uso de caseína de la leche. Este análisis busca reducir la alteración ambiental de la industria textil, notable por su gran uso de recursos y generación de residuos. Con la ayuda de una metodología combinada, se procuró adquirir fibras a partir de la caseína, sin embargo se lograron películas con propiedades escasas como en resistencia y flexibilidad.

Los resultados alcanzados proporcionan nuevas líneas de investigación para renovar las propiedades mecánicas de las películas de caseína. Se propone investigar sobre agentes reticulantes y optimizar las condiciones de producción. A pesar de los desafíos, el potencial de la caseína como materia prima y la sostenibilidad del proceso ofrecen un enfoque prometedor para desarrollar textiles más sustentables. Se sugiere realizar más búsquedas para superar las limitaciones actuales y lograr la producción a escala industrial de fibras de caseína con las características necesarias para su aplicación.

Palabras claves: *Película textil, caseína, resistencia, proceso, investigación.*

ABSTRACT

The research analyzes a sustainable variable to conventional textiles, proposing the use of milk casein. This analysis seeks to reduce the environmental alteration of the textile industry, notable for its great use of resources and waste generation. With the help of a combined methodology, we tried to acquire fibers from casein, however, we achieved films with poor properties such as resistance and flexibility.

The results achieved provide new lines of research to renew the mechanical properties of casein films. Research on crosslinking agents and optimization of production conditions are proposed. Despite the challenges, the potential of casein as a raw material and the sustainability of the process offer a promising approach to developing more sustainable textiles. Further research is suggested to overcome the current limitations and achieve industrial-scale production of casein fibers with the necessary characteristics for their application.

Keywords: *Textile film, casein, resistance, process, research.*

I. INTRODUCCIÓN

Durante el siglo XX, la ciencia y la industria se enfocaron en explorar y desarrollar materiales innovadores mediante el aprovechamiento de residuos alimentarios, con el objetivo de satisfacer la demanda de textiles y mitigar el impacto ambiental asociado a su producción (1). Esta necesidad se intensificó durante las guerras mundiales, cuando se introdujeron las fibras proteínicas regeneradas (FPR) como alternativa a las fibras naturales, como algodón y la lana, que resultaban insuficientes en esa época (2).

Pese a, los avances tecnológicos, la industria textil se mantiene como una de las principales fuentes de daño ambiental. Las fibras naturales como el algodón, la seda y la lana ocasionan impactos significativos, recalando que la producción de lana representa el 36% de la huella de carbono del sector (1). Este impacto se impone por el uso excesivo de agua, la generación masiva de desechos y la influencia de materias primas de fuente virgen, lo que aporta considerablemente al cambio climático (3). En Ecuador, la falta de control y compromiso en la ejecución técnica de gestión ambiental agudiza estos problemas (4).

Entre las alternativas emergentes, la caseína, una proteína que representa el 80% en la leche, se posiciona como una materia prima renovable y versátil para la producción de fibras textiles (5,6). Esta proteína, junto con el suero, forma parte de las fracciones principales de las proteínas lácteas, siendo la caseína separable y altamente aprovechable para aplicaciones industriales, es esencial para el ser humano debido a su alto contenido proteico (7–9). Su carácter biodegradable y biocompatible la convierte en una opción respetuosa con el medio ambiente, ofreciendo una solución más limpia frente a las fibras sintéticas derivadas de combustibles fósiles.

Históricamente, las fibras basadas en caseína fueron exploradas como respuesta a la escasez de recursos textiles en el siglo pasado. No obstante, el crecimiento del sector textil, impulsado por el consumismo, ha intensificado la extracción de recursos no renovables y agravado la contaminación ambiental (10). En este contexto, el de la caseína ha retornado por su capacidad para abordar los problemas ambientales actuales, indagaciones recientes proponen que su integración en el sector textil permitiría

convertirla en un material clave para el futuro de la moda sostenible (11).

Entre quienes han reanimado este enfoque distingue la científica Anke Domaske, quien asoció el potencial de la caseína, una proteína derivada de leche, para la creación de textiles sostenibles (12). Este desarrollo responde a la creciente presión de los consumidores, especialmente de los más jóvenes, quienes demandan productos con menor huella de carbono y fomentan prácticas más conscientes en la industria (13,14).

La presente investigación tuvo como finalidad elaborar una película textil sostenible a partir de la caseína de la leche por medio de la identificación de las condiciones óptimas para su extracción y purificación empleando procesos fisicoquímicos, evaluando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Además, se fijará la viabilidad técnica y económica del proceso, empleando métodos estadísticos para la idónea discriminación y análisis de los datos coleccionados en la investigación.

Los datos adquiridos fueron analizados por el Software Minitab con un nivel de confianza del 5%.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Actualmente, se utilizan comúnmente diversas tecnologías para separar las proteínas de la leche de la fase sérica, como fraccionamiento, concentración, coagulación y secado. Esto ha llevado a la fabricación de diferentes productos proteicos que están disponibles en los mercados, incluidos productos de caseína y productos de proteína de suero (15).

Las proteínas no son nuevas, existen desde hace muchos años y los procedimientos de fabricación son relativamente sencillos. Las tecnologías tradicionales para la fabricación de estos productos incluyen la coagulación ácida o por cuajo (16).

Para determinar el método más eficiente para extraer caseína de la leche y desarrollar películas textiles sostenibles, se planteó un diseño de bloques completamente al azar. Este diseño experimental permitió apreciar el impacto de diferentes variables fisicoquímicas, como la coagulación ácida, la neutralización y el lavado. Los coagulados obtenidos fueron sometidos

a procesos de triturado, tamizado, filtrado y secado para obtener una materia prima oportuna para el desarrollo de películas. Posteriormente, se caracterizaron las películas obtenidas para determinar sus propiedades físicas y químicas.

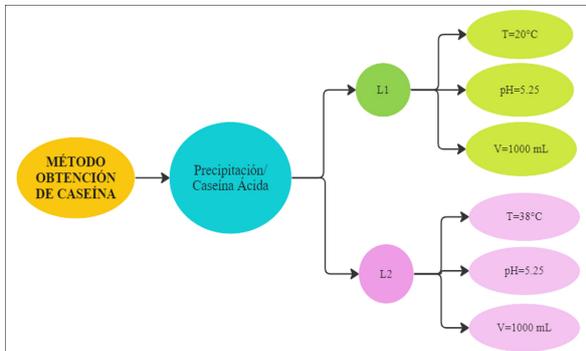


Figura 1. Diseño experimental para obtener caseína ácida (17).

La indagación se empezará coagulando la leche con ácido acético a varias temperaturas (20°C y 38°C), dando como resultado dos lotes de caseína. Posteriormente, se modificarán la temperatura y la concentración de NaOH para evaluar su influencia en la formación de películas textiles.

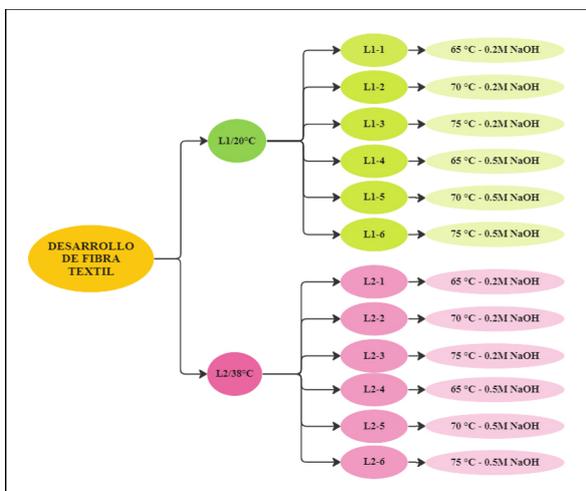


Figura 2. Diseño experimental para desarrollar la película textil (17).

Los lotes de caseína alcanzados a 20°C y 38°C proporcionarán como punto de partida para la producción de películas. Se efectuarán diferentes tratamientos variando la concentración de NaOH y la temperatura de calentamiento para evaluar su influencia en las propiedades de las películas.

a. Obtención de caseína por precipitación/ácido acético

Con el propósito de obtener la caseína, se llevó a cabo un proceso fisicoquímico minucioso en

varios pasos. Inicialmente, se parte de leche entera pasteurizada, y se realizan dos lotes diferenciados. En el primer lote (L1), se mantiene la leche a temperatura ambiente (20°C), en cambio en el segundo lote (L2), se eleva la temperatura a 38°C.

A los dos simultáneamente, se añade ácido acético hasta llegar a un pH de 5.25. Este paso es determinante para precipitar la caseína, este proceso sucede durante un día. Posteriormente, se lleva a cabo la filtración del precipitado, seguido de un lavado meticuloso con etanol (40 ml) y agua destilada (80 ml). Una vez culminada esta etapa, se procede a pesar el material filtrado.

Se adquiere un polvo de caseína de tamaño estándar tras un proceso de secado, triturado y tamizado.

Seguidamente, se especifica un diagrama de flujo del proceso.

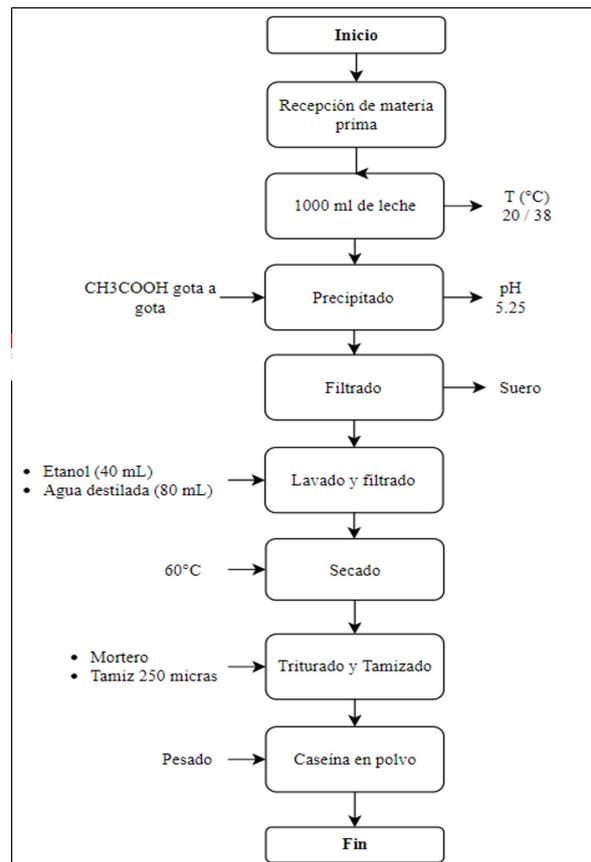


Figura 3. Proceso de extracción de caseína a 20°C y 38°C, (18–20)

Para una mejor comprensión y visualización del proceso de extracción de la caseína de la leche, se presenta una ilustración detallada en la Figura 4.

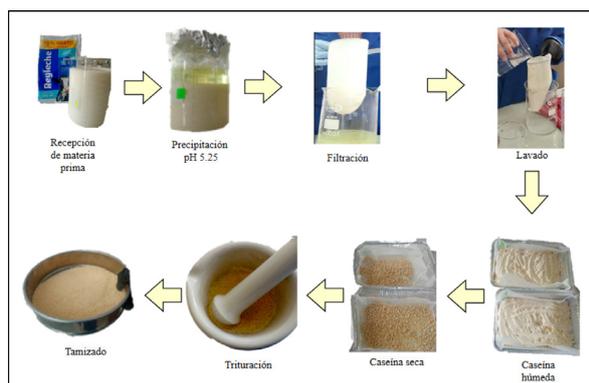


Figura 4. Esquema de extracción de caseína a 20°C y 38°C, (18–20).

b. Proceso de desarrollo de película textil.

Se disponen mezclas de caseína, agua, glicerina y NaOH a diferentes concentraciones para adquirir películas textiles.

La mezcla obtenida se somete a agitación y luego se lleva a cabo un calentamiento a varias temperaturas de acuerdo con las especificaciones del proceso. Opcionalmente, se puede agregar un agente reticulante, para mejorar las propiedades de la película. La mezcla se agita y se calienta a distintas temperaturas.

Se finaliza el proceso secando la mezcla en una estufa a 45°C. A continuación, se ilustra el proceso en un diagrama de flujo.

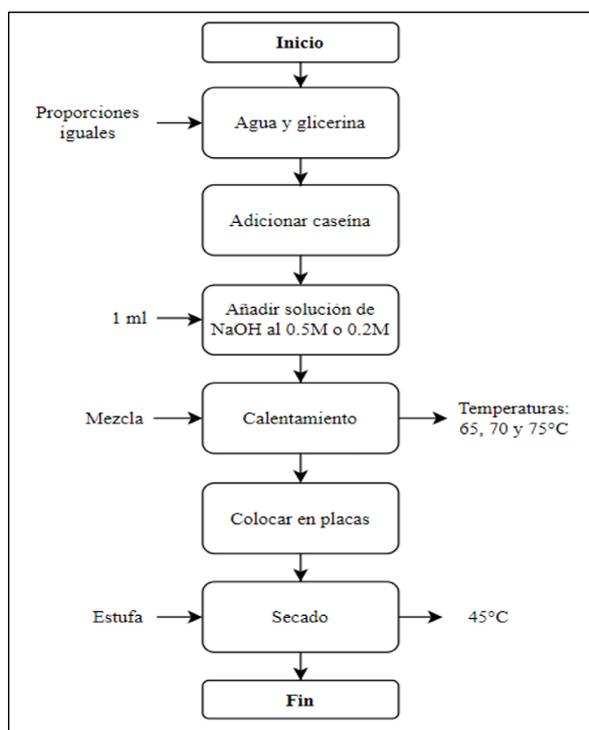


Figura 5. Proceso para desarrollar la película textil (21).

Para facilitar la comprensión y visualización del proceso de desarrollo de la película textil, se ilustra detalladamente en la Figura 6.

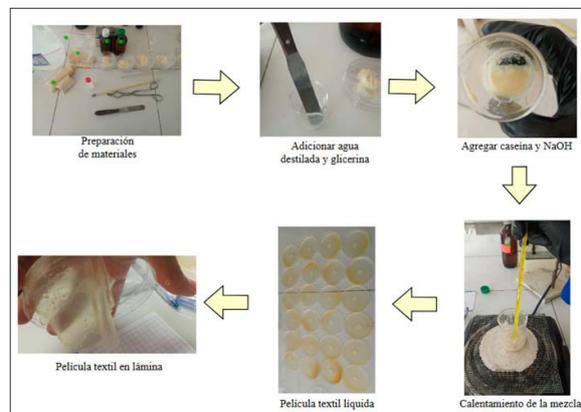


Figura 6. Esquema para desarrollar la película textil (21).

III. RESULTADOS

a) Obtención de Caseína

Se trató 1000 ml de leche a 20°C y 38°C, acidificando a pH 5.25. Los resultados de la cantidad de caseína adquirida se exponen en la tabla siguiente:

Tabla 1. Cantidad de caseína obtenida por cada Lote.

LOTE	T (°C)	pH	V. Leche (ml)	Cantidad de Caseína (g)
L1	20	5.25	1000	44
L2	38	5.25	1000	54

Fuente: (17).

A la temperatura de 38°C es más eficiente para obtener caseína.

b) Resultados obtenidos de la caracterización de la proteína.

Los resultados adquiridos para la caracterización de la leche de cada lote se presentan en la Tabla 2, usando el equipo LACTOSCAN MILKANALYZER de la Facultad de Ciencias del Laboratorio de Bromatología.

Tabla 2. Parámetros obtenidos para la caracterización de la leche.

Lote	Grasas (F)	Densidad (D)	Caseína (C)	Sólidos totales (S)	Proteína (P)	Lactosa (L)	Sal (S)	Agua (A)
L1	3.59	6.9	3.71	2.54	1.01	1.33	0.19	6.13
L2	3.82	6.66	3.62	2.52	1	1.32	0.19	6.34

Fuente: (17).

Los datos asociados con la operación unitaria de secado se presentan en la Tabla 3, que incluyen las cantidades iniciales y finales de caseína para el respectivo lote. El proceso de secado se realizó utilizando un secador de bandejas a una temperatura constante de 60°C durante 15 horas. Los rendimientos alcanzados fueron de 60.71% en el primer lote y de 63.76% para el segundo, evidenciando la eficiencia del proceso en la recuperación de caseína.

Tabla 3. Datos de la operación de secado de caseína.

LOTE	Masa Inicial (g)	Masa final (g)	Tiempo (H)	T (°C)	Rendimiento
					(%)
L1	112	44	16	20	60.71
L2	149	54	16	38	63.76

Fuente: (17).

Los resultados indican una reducción importante en la masa inicial durante el proceso de secado, lo que evidencia la efectiva eliminación de humedad del producto. Además, se observa una diferencia en el rendimiento de la caseína entre los dos lotes, posiblemente relacionada con variaciones en la temperatura de acidificación. Las curvas de secado correspondientes al Lote 1, que se presentan en las Figura 7 y 8, apoyan estos hallazgos.

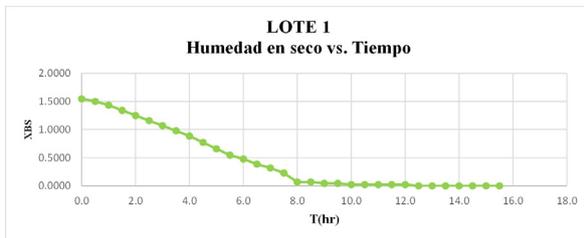


Figura 7. Curva de secado del Lote 1, (17).

En la Figura , se observa que después de 15 horas de secado, la caseína se redujo de 112 a 44 gramos, con un rendimiento del 60.71%, demostrando una eficiente eliminación de humedad.

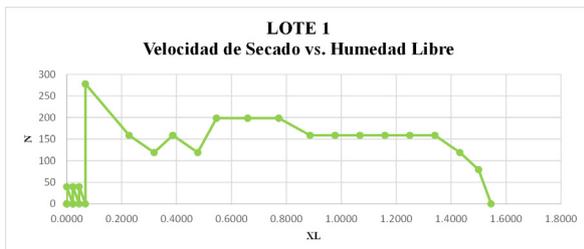


Figura 8. Curva de velocidad del Lote 1, (17).

La Figura 8, se identifica que la velocidad de secado inicial fue constante a 297.6190, variando repentinamente según la humedad libre, que

comenzó en 0.0227 y fluctuó entre 0.8864 y 1.3409.

Las Figura 9 y 10 muestran las curvas correspondientes al Lote 2.

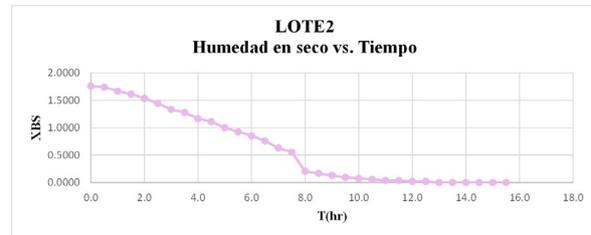


Figura 9. Curva de secado del Lote 2, (17).

En la Figura. 9, se puede interpretar que después de 15 horas de secado, la caseína partió con un total de 149 gramos (para 1000 ml) y después de este proceso se obtuvo 54 gramos con un rendimiento del 63.76%.

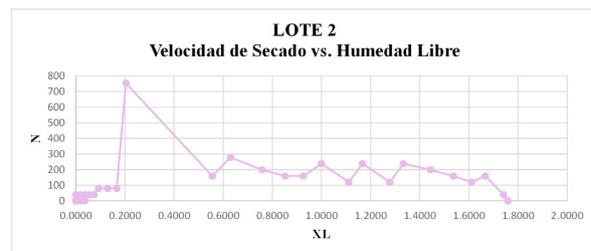


Figura 10. Curva de velocidad del Lote 2, (17).

La Figura. 10, muestra que la velocidad de secado varía, comenzando desde cero con una humedad libre de 0.0185 y manteniéndose constante a 238.0952 entre XL de 1.0000 y 1.3333, evidenciando la relación entre velocidad y humedad libre durante el secado.

c) Resultados obtenidos de la caracterización de la película textil.

Los resultados alcanzados evidenciaron la formación de películas en lugar de fibras, debido a varios factores que influyeron en el desarrollo del proceso. Seguidamente, en la Tabla 4, se muestran las propiedades físicas de la película textil.

Tabla 4. Resultados respecto a las propiedades físicas de la película.

Codificación	Estructura (Lisa)	Espesor (mm)	Color
L1-1	SI	0.80	Amarillo claro
L1-2	SI	0.78	Amarillo claro
L1-3	SI	0.81	Amarillo claro
L1-4	-	-	-
L1-5	-	-	-
L1-6	-	-	-

L1-6	-	-	-
L2-1	SI	0.79	Crema
L2-2	SI	0.79	Crema
L2-3	SI	0.80	Amarillo claro
L2-4	-	-	-
L2-5	-	-	-
L2-6	-	-	-

Fuente: (17).

La película posee una estructura lisa con un espesor que varía entre 0.78 y 0.81 mm, y su color sobresaliente es un amarillo claro, con algunas muestras en tono crema. Conforme a las propiedades mencionadas la película textil, es fácil de manipular. La Tabla 5 muestra su comportamiento al fuego.

Tabla 5. Resultados de reacción a la llama de la película.

NaOH (M)	T (°C)	Codificación	Se funde cerca de la llama	Se contrae y aleja de la llama	Arde con la llama	Continúa quemando al retirar la llama	Apariencia de ceniza
0.2	65	L1-1	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	70	L1-2	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	75	L1-3	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
0.5	65	L1-4	-	-	-	-	-
	70	L1-5	-	-	-	-	-
	75	L1-6	-	-	-	-	-
0.2	65	L2-1	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	70	L2-2	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
	75	L2-3	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
0.5	65	L2-4	-	-	-	-	-
	70	L2-5	-	-	-	-	-
	75	L2-6	-	-	-	-	-

Fuente: (17).

Con la ayuda del análisis de las películas textiles revela que son poco resistentes al calor, disolviéndose rápidamente, continuando la combustión tras retirar la llama y dejando una masa negra con apariencia de ceniza. Es decir que, estas películas podrían no ser adecuadas para aplicaciones que requieran alta resistencia térmica, lo que debe considerarse al determinar sus posibles usos.

Los resultados logrados muestran que la película textil es insoluble en todos los solventes utilizados, como indica la letra "I" en cada celda de los resultados.

Por otro lado, la Tabla 6 muestra que las películas textiles son insolubles en ácido acético, acetona, ácido fórmico y ácido sulfúrico, manteniendo esta propiedad constante a 20°C, independientemente de las concentraciones y tiempos de exposición.

Sin embargo, la lámina presenta fragilidad, evidenciada por su baja resistencia al ser despegada de la caja Petri, lo que impide realizar pruebas de tracción para evaluar su resistencia mecánica. Este resultado destaca la necesidad de mejorar la resistencia de la película y de considerar métodos alternativos para su identificación y aplicación.

Tabla 6. Resultados de la solubilidad de la película.

Parámetros	Ácido acético	Acetona	Ácido fórmico	Ácido sulfúrico
Concentración (%)	100	100	85	70
Temperatura (°C)	20	20	20	20
Tiempo (min)	5	5	5	20
L1-1	I	I	I	I
L1-2	I	I	I	I
L1-3	I	I	I	I
L1-4	-	-	-	-
L1-5	-	-	-	-
L1-6	-	-	-	-
L2-1	I	I	I	I
L2-2	I	I	I	I
L2-3	I	I	I	I
L2-4	-	-	-	-
L2-5	-	-	-	-
L2-6	-	-	-	-

Fuente: (17).

d) Resultados de la Viabilidad Técnica

Según los parámetros de la Tabla 7, se evaluará la viabilidad técnica del proyecto de investigación para determinar su factibilidad durante el desarrollo.

Tabla 7. Análisis de Viabilidad Técnica.

Factor	Descripción	Viabilidad	Observaciones
Disponibilidad de materia prima.	La caseína es un producto poco abundante en la leche, depende del método de extraer.	Media	Poco abundante en la leche.
Calidad de la caseína	Debe ser de alta calidad.	Media	Requiere que cumpla ciertos parámetros para asegurar su calidad.

Cantidad de caseína en preparación	Debe ser en gran cantidad para poder garantizar gran volumen de película.	Media	Depende de la escala de producción.
Tiempo de secado de caseína.	Debe ser menor tiempo para evitar costos.	Baja	Se puede optimizar con tecnología adecuada.
Formulación para desarrollar la película.	Una vez extraída la caseína es fácil el proceso.	Alta	Proceso no es muy complejo para determina una película de tipo no tejida.
Potencial de aplicación	Las películas deben tener una variedad de aplicación en la industria textil.	Baja	Se requieren más investigaciones para explorar aplicaciones potenciales.
Costo de producción	Se requiere optimizar el proceso para reducir costos.	Media	Se puede mejorar con el desarrollo de la tecnología y la producción a gran escala.

Fuente: (17).

La viabilidad técnica del proyecto de producción de películas textiles a partir de caseína presenta desafíos, principalmente debido a la disponibilidad media de materia prima, ya que solo se obtiene aproximadamente un 50% de caseína a partir de 1000 ml de leche. La calidad y cantidad de caseína, así como el tiempo de secado, son factores críticos que deben optimizarse para reducir costos. A pesar de todo la formulación para la película no es complicada, la producción de fibra en forma de hilo requiere nuevas técnicas. Es crucial explorar más a fondo el potencial de aplicación de la película textil de caseína y optimizar el proceso de producción para mejorar la competitividad y reducir costos. La viabilidad técnica es prometedora, pero se necesitan estudios adicionales para optimizar el proceso y evaluar sus aplicaciones futuras en la industria textil.

e) Resultados de la Viabilidad Económica

De acuerdo con un análisis detallado de la viabilidad económica en la escala experimental de laboratorio. La producción de láminas de caseína es costosa debido a equipos y mano de obra, lo que impide su producción industrial.

f) Análisis estadístico cuantitativo

Inicialmente se programó una prueba de resistencia mecánica, pero dadas las características del material, se optará por un método manual.

Tabla 8. Resultados de resistencia a la tracción de la película de manera manual.

Lote	Codificación	Tracción	Concentración NaOH	Temperatura (°C)
L1	L1-1	1	0.2	65
	L1-2	2	0.2	70
	L1-3	2	0.2	75
	L1-4	0	0.5	65
	L1-5	0	0.5	70
	L1-6	0	0.5	75
L2	L2-1	1	0.2	65
	L2-2	2	0.2	70
	L2-3	2	0.2	75
	L2-4	0	0.5	65
	L2-5	0	0.5	70
	L2-6	0	0.5	75

Fuente: (17).

Donde:

Alto: 2

Medio: 1

Bajo: 0

Se utilizó un ANOVA de dos factores para evaluar cómo la concentración de NaOH y la temperatura afectan la resistencia de la película.

- **Para las concentraciones de NaOH (M)**

HO: Las concentraciones de NaOH (M) no generan diferencias en la resistencia de la película.

HA: Al menos una concentración de NaOH (M) genera diferencia en la resistencia de la película.

- **Para las temperaturas**

HO: Las temperaturas no generan diferencias en la resistencia de la película.

HA: Al menos una temperatura genera diferencia en la resistencia de la película.

Las cuales fueron contrastadas mediante pruebas de comparación de medias, considerando un nivel de significancia del 5%.

Método					
Codificación de factores (-1; 0; +1)					
Información del factor					
Factor	Tipo	Niveles Valores			
Concentración NaOH	Fijo	2 0.2; 0.5			
Temperatura (°C)	Fijo	3 65; 70; 75			
Análisis de Varianza					
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Concentración NaOH	1	8.33333	8.33333	100.00	0.000
Temperatura (°C)	2	0.66667	0.33333	4.00	0.062
Error	8	0.66667	0.08333		
Falta de ajuste	2	0.66667	0.33333	*	*
Error puro	6	0.00000	0.00000		
Total	11	9.66667			

Figura 11. Modelo lineal: Tracción vs. Concentración NaOH; Temperatura (°C) (17).

El análisis ANOVA mostró que tanto la concentración de NaOH (especialmente 0.5 M) como la temperatura afectan la resistencia de la película.

Resumen del modelo					
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)		
0.288675	93.10%	90.52%	84.48%		
Coeficientes					
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0.8333	0.0833	10.00	0.000	
Concentración NaOH					
0.2	0.8333	0.0833	10.00	0.000	1.00
Temperatura (°C)					
65	-0.333	0.118	-2.83	0.022	1.33
70	0.167	0.118	1.41	0.195	1.33

Figura 12. Modelo lineal: Tracción vs. Concentración NaOH; T (°C), (17).

Los resultados del análisis estadístico, corroborados por la observación de los datos en la Figura 12, indican que la temperatura de 65°C y la concentración de NaOH de 0.5 M tienen un efecto significativo sobre la resistencia de la película. En particular, a 0.5 M de NaOH, las películas de los Lotes 1 y 2 no presentaron resistencia, mientras que a 0.2 M sí lo hicieron.

IV. DISCUSIÓN

La película textil desarrollada en este estudio presenta características físicas y químicas comparables en cuanto a su estructura y la reacción que presenta la película al estar expuesta

al calor o algún compuesto soluble (21,22). No obstante, los resultados obtenidos en cuanto a propiedades mecánicas no son tan favorables. Este comportamiento es consistente con las fibras proteínicas de ingeniería existentes, las cuales suelen mostrar un rendimiento mecánico débil en comparación con las fibras naturales (23).

A diferencia de estudios anteriores que utilizaban aditivos como aceite de parafina, cera o glucosa (21,22), el presente estudio se centró en minimizar el uso de compuestos químicos, lo cual podría haber afectado las propiedades mecánicas de la película. Además, la imposibilidad de emplear la técnica de electrohilado, debido a la falta de equipo, llevó a la producción de láminas no tejidas en lugar de fibras. Esta diferencia en el método de fabricación influyó negativamente en la resistencia de la película, como se evidencia en los Lotes 1 y 2.

Es importante destacar que, si bien las propiedades mecánicas no alcanzaron los niveles de otros estudios, este trabajo se enfocó en el desarrollo de una película textil más sostenible, evitando el uso de compuestos peligrosos como el ácido sulfúrico y el formaldehído (24–26). Esta elección implicó un cambio de enfoque hacia la producción de láminas no tejidas, lo cual representa una innovación en el campo, aunque plantea desafíos técnicos en términos de resistencia.

En conclusión, la película textil desarrollada en este estudio ofrece una alternativa más sostenible a las películas convencionales, al utilizar menos compuestos químicos y evitar métodos de producción peligrosos. Sin embargo, es necesario realizar investigaciones adicionales para mejorar las propiedades mecánicas y explorar nuevas técnicas de fabricación que permitan obtener películas con mayor resistencia sin comprometer su carácter sostenible.

V. CONCLUSIONES

Se desarrolló una película textil sostenible a partir de caseína de leche, utilizando un proceso fisicoquímico que incluyó precipitación, filtración y secado. Se realizaron experimentos variando la temperatura y la concentración de NaOH para optimizar las condiciones de producción.

Se estableció un protocolo detallado para la

extracción y purificación de caseína a partir de leche, empleando ácido acético como agente precipitante. Se optimizaron los parámetros de lavado y secado para obtener un producto de alta pureza.

Se identificaron las condiciones óptimas para la obtención de caseína, determinando el pH y la temperatura ideales para maximizar el rendimiento del proceso. Además, se establecieron los volúmenes de etanol y agua destilada necesarios para los lavados.

Se caracterizaron las películas obtenidas en términos de espesor, estructura, comportamiento ante el fuego y solubilidad en diferentes solventes. Las propiedades mecánicas se evaluaron de manera cualitativa debido a la baja resistencia de las películas. Los resultados indicaron que las películas elaboradas con 0.2 M de NaOH presentaron mejor resistencia que aquellas con 0.5 M.

Se evaluó la viabilidad técnica y económica del proceso de producción de películas textiles a partir de caseína. Se concluyó que se requieren

más investigaciones para mejorar las propiedades mecánicas y optimizar el proceso desde el punto de vista económico.

Se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos, utilizando una tabla de frecuencias e interpretación de datos. Los resultados indicaron que las películas elaboradas con 0.2 M de NaOH a 70 y 75°C presentaron las mejores propiedades. Debido a la baja resistencia de las películas, se realizó un análisis cualitativo de la resistencia y se utilizó el software Minitab para un análisis más detallado.

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a la Facultad de Ciencias y a la carrera de Ingeniería Química, por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación en sus laboratorios. Expreso mi sincera gratitud a la Ing. Mabel Parada y al Dr. Robert Cázár por su invaluable guía y conocimientos durante el desarrollo de este trabajo. Así mismo, agradezco al Ing. Paúl Manobanda por su apoyo.

V. REFERENCIAS

1. Stenton M, Houghton JA, Kapsali V, Blackburn RS. The potential for regenerated protein fibres within a circular economy: Lessons from the past can inform sustainable innovation in the textiles industry. *Sustainability (Switzerland)* [Internet]. 2021 Feb 2 [cited 2023 Nov 8];1-18. Available from: <https://doi.org/10.3390/su13042328>
2. Auerbach H, Blackburn RS, Houghton JA, Kapsali V, Stenton M. Referencing Historical Practices and Emergent Technologies in the Future Development of Sustainable Textiles: A Case Study Exploring "Ardil", a UK-Based Regenerated Protein Fibre. *Sustainability (Switzerland)* [Internet]. 2022 Jul 1 [cited 2023 Nov 8];2-18. Available from: <https://doi.org/10.3390/su14148414>
3. Pastrana M, Almanza M. Fast Fashion: ¿moda o contaminación? Fast Fashion: Trend or Pollution? 2021 [cited 2023 May 14]. Available from: <https://www3.ugto.mx/eugreka/images/abejas/fast-fashion-moda-o-contaminacion.pdf>
4. Bermeo J. EVALUACIÓN DE LOS ASPECTOS AMBIENTALES EN UNA EMPRESA TEXTIL. Universidad Politécnica SALESIANA [Internet]. 2015 [cited 2023 May 15]. Available from: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13422/1/UPS-GT001778.pdf>
5. Atamer Z. Production and Physicochemical Properties of Casein-Based Adhesives. *Akademik Gida* [Internet]. 2022 [cited 2023 Nov 8];12-9. Available from: <https://doi.org/10.24323/akademik-gida.1097805>
6. Costa C, Azoia NG, Coelho L, Freixo R, Batista P, Pintado M. Proteins derived from the dairy losses and by-products as raw materials for non-food applications. *Foods* [Internet]. 2021 Jan 1 [cited 2023 Nov 8];1-8. Available from: <https://doi.org/10.3390/foods10010135>
7. Badem A, Uçar G. Production of caseins and their usages. *International Journal of Food Science and Nutrition* [Internet]. 2017;2455-4898. Available from: <https://www.researchgate.net/>

- publication/330674713
8. Padilla Doval J, Zambrano Arteaga JC. Estructura, propiedades y genética de las caseínas de la leche: una revisión. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia* [Internet]. 2021 Dec 31 [cited 2024 Feb 19];16(3):62-95. Available from: <https://doi.org/10.21615/cesmvz.5231>
 9. Carter BG, Cheng N, Drake MA, Kapoor R, Meletharayil GH. Invited review: Microfiltration-derived casein and whey proteins from milk. *Journal of Dairy Science* [Internet]. 2021 Mar 1 [cited 2023 Nov 8];2465-79. Available from: <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18811>
 10. García M. ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD EN EL SECTOR TEXTIL. 2021 [cited 2023 Jul 26]. Available from: <https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/52786/2/TFG%20-%20Garcia%20Quesada%2C%20Maria.pdf>
 11. AFP-Relaxnews. La leche, una fibra textil casi como cualquier otra. *FASHION_Network* [Internet]. 2022 [citado 16 de junio de 2023]; Disponible en: <https://pe.fashionnetwork.com/news/La-leche-una-fibra-textil-casi-como-cualquier-otra,1434141.html#msgm>
 12. Kutsche J, Papaleo C. Qmilch. El tejido ecológico hecho de leche de vaca. *NOVIEMBRE* [Internet]. 2011 [cited 2023 May 15]. Available from: https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/23700542/helvia/sitio/upload/RinconTec_12.pdf?fbclid=IwAR3i6bMkVa8WWImF9ZRrPCEeHmha6-hJNrUrbXgi3Eddl2OvCuA1kTV-8MM
 13. Campues Carolina. Desarrollo de un género textil a partir del tallo de ortiga [Internet]. Ambato, Ecuador: Universidad Técnica de Ambato; 2022 [cited 2023 Jul 26]. Available from: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/34517/1/Campues%20Carolina.pdf>
 14. Mena F. APLICACIÓN DE UN ACABADO ANTIALÉRGICO CON LECHE EN TELA 100% ALGODÓN. 2020 [cited 2023 Jul 26]. Available from: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10173/2/04%20IT%20260%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
 15. Hammam A, Martínez S, Metzger L. Progress in micellar casein concentrate: Production and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* [Internet]. 2021 Sep 1 [cited 2023 Nov 8];4426-49. Available from: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12795>
 16. Mistry VV. Manufacture and application of high milk protein powder. *Lait* [Internet]. 2002 [cited 2023 Nov 8];515-22. Available from: <https://doi.org/10.1051/lait:2002028>
 17. Llano D. DESARROLLO DE UNA FIBRA TEXTIL SOSTENIBLE A PARTIR DE LA CASEÍNA DE LA LECHE MEDIANTE PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS [Internet]. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo; 2024 [cited 2024 Dec 11]. Available from: <http://dspace.esepoch.edu.ec/handle/123456789/22806>
 18. Álvarez J, Mejía Y. Extracción de caseína y determinación de PI. 2016 [cited 2023 Dec 11]. Available from: https://www.academia.edu/24272268/Extracci%C3%B3n_de_case%C3%ADna_y_determinaci%C3%B3n_de_PI
 19. Farfán A, Pandal L, Rodríguez L, Silva A. EXTRACCIÓN DE CASEINA Y DETERMINACIÓN DEL PUNTO ISOELÉCTRICO. 2023 [cited 2023 Dec 11]. Available from: <https://es.scribd.com/document/629061170/Extraccion-de-Caseina-y-Determinacion-Del-Punto-Isoelectrico>
 20. Barriga D, López Á. LA LECHE COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera CONSEJERIA DE AGRICULTURA, PESCA Y DESARROLLO RURAL [Internet]. 2016 [cited 2023 Dec 11];4-13. Available from: <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/436502c6-f47c-42ab-a053-f3ab26dee712>
 21. Bier MC, Kohn S, Stierand A, Grimmelsmann N, Homburg SV, Rattenholl A, et al. Investigation of eco-friendly casein fibre production methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [Internet]. 8 de noviembre de 2017 [citado 8 de noviembre de 2023];1-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/254/19/192004>

22. Bier MC, Ehrmann A, Homburg SV, Grimmelsmann N, Kohn S, Stierand A. Investigation of the casein fibre production in an eco-friendly way. International Textile Conference [Internet]. 2016;1-4. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/310832654>
23. Chen D, Fan C, Gu R, Hu H, Li B, Liu K, et al. Robust Biological Fibers Based on Widely Available Proteins: Facile Fabrication and Suturing Application. Small [Internet]. 1 de febrero de 2020 [citado 8 de noviembre de 2023];1-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/sml.201907598>
24. Blackburn R, Houghton J, Kapsali V, Stenton M. From clothing rations to fast fashion: Utilising regenerated protein fibres to alleviate pressures on mass production. Energies [Internet]. 1 de septiembre de 2021 [citado 8 de noviembre de 2023];2-18. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en14185654>
25. Gebhardt R, Schmidt T, Thill S, Wöll D. A regenerated fiber from rennet-treated casein micelles. Colloid and Polymer Science [Internet]. 2021;910-3. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00396-020-04802-5>
26. Bouchet B, Dumont J, Frinault A, Gallant D. Preparation of Casein Films by a Modified Wet Spinning Process. JOURNAL OF FOOD SCIENCE [Internet]. 1997 [citado 8 de noviembre de 2023];744-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1111>