



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

T E S I S

**EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE QUERATINA OBTENIDA DEL
PELO DE CONEJO MEDIANTE HIDRÓLISIS ALCALINA**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

P R E S E N T A

LUIS KEVIN TREJO VARGAS

DIRECTOR

DR. GABRIEL AGUIRRE ÁLVAREZ

CODIRECTORA

DRA. GIERALDIN CAMPOS LOZADA

COMITÉ TUTORIAL

DRA. XÓCHITL ALEJANDRA PÉREZ MARROQUÍN

DRA. GRACIELA CALLEJAS QUIJADA

TULANCINGO DE BRAVO, 9 DE MAYO 2026



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Instituto de Ciencias Agropecuarias

Institute of Agricultural Sciences

Área Académica de Ingeniería Agroindustrial e Ingeniería en Alimentos

Academic Area of Agroindustrial engineering and Food Engineering

Santiago Tulantepec de Lugo Guerrero, Hidalgo, a 6 de Mayo del 2026.

Asunto: Autorización de impresión

Mtra. Ojuky del Rocío Islas Maldonado
Directora de Administración Escolar de la UAEH

Por este conducto y con fundamento en el Título Cuarto, Capítulo I, Artículo 40 del Reglamento de Titulación, le comunico que el jurado que le fue asignado al pasante de Licenciatura en Ingeniería Agroindustrial, **Trejo Vargas Luis Kevin** quien presenta el trabajo de Tesis denominado "**Extracción y caracterización de queratina obtenida del pelo de conejo mediante hidrólisis alcalina**", que después de revisarlo en reunión de sinodales, ha decidido autorizar la impresión de este, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los miembros del comité revisor:

Dr. Gabriel Aguirre Alvarez

Dra. Gieraldin Campos Lozada

Dra. Xóchitl Alejandra Pérez Marroquín

Dra. Graciela Callejas Quijada

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Dr. Yair Oloveldo Santiago Sáenz
Coordinador del P.E. de Ingeniería Agroindustrial

Av. Universidad No. 133, Col. San Miguel Huatengo, Santiago
Tulantepec. C.P. 43775. Hidalgo, Mexico.
Teléfono: 7717172000 Ext. 42021
ricardo_navarro@uaeh.edu.mx



"Amor, Orden y Progreso"



uaeh.edu.mx

DEDICATORIA

Un trabajo de constancia y esmero rinden grandes frutos

Esta tesis se lo dedico a mis padres a mis abuelos a toda mi familia ya que sin su ayuda yo no hubiera conseguido ser la persona que soy y no hubiera llegado hasta donde estoy.

Agradezco la paciencia y el apoyo que me brindaron en este trayecto académico siendo pilares importantes en mi educación que con palabras de aliento se convirtieron en un motor importante y una razón de lograr cada uno de mis objetivos y así lograr cada una de mis metas.

De igual manera esta tesis tiene dedicatoria a todos los que ayudaron a mi mejoramiento académico a todos los maestros, doctores que con cada una de sus enseñanzas fueron guiando cada uno de mis pasos aconsejando y logrando mi superación académica motivándome a seguir adelante y a enfocarme en cada uno de mis metas personales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre y a mi padre por el cariño y amor incondicional, el afecto y el apoyo que día con día me dieron apoyándome y aconsejándome, logrando que no me rindiera.

Su esfuerzo y su dedicación lograron en mí una enseñanza importante en la cual debo luchar por lo que deseo que no debo detenerme y seguir adelante y nunca olvidar de dónde vengo y cada una de las enseñanzas proporcionadas por ellos.

A mis abuelos (Mama Bertha, Papa Rafael, Mamá Carmen y Papá Braulio) que con su amor ternura y a cada uno de los consejos que brindaron y todo el apoyo que me dieron no estaría donde estoy logrando cada uno de mis metas y gracias por el mejor consejo que alguien me puede dar el cual nunca deje de soñar hasta que se haga una realidad y sobre todo que siempre luche por mis ideales y mis objetivos

A mi hermano porque gracias a él yo me esforcé para ser un ejempló para él y demostrarle que si te lo propones lo cumplirás y sobre todo que no hay que rendirse pase lo que pase.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
2	HIPÓTESIS	4
3	ANTECEDENTES	5
4	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
5	JUSTIFICACIÓN	9
6	MARCO TEÓRICO	10
6.1	Pelo	10
6.2	Anatomía y estructura del pelo.....	10
6.2.1	Estructura física del pelo	10
6.2.1.1	Estructura Superficial	10
6.2.1.1.1	La cutícula.....	11
6.2.1.2	Estructura Interna.....	12
6.2.1.2.1	El córtex	12
6.2.1.2.2	La médula	13
6.2.2	Estructura química del pelo	13
6.3	Queratina	13
6.3.1	Tipos de queratina	14
6.4	Estructura de la queratina	14
6.4.1	Estructura primaria	15
6.4.2	Estructura secundaria.....	15
6.4.3	Estructura terciaria.....	16
6.5	Composición fisicoquímica de la queratina	17

6.6	Degradación de la queratina	17
6.6.1	Hidrolisis de la queratina	18
6.7	Métodos de extracción de queratina	18
6.7.1	Método ácido	18
6.7.2	Método alcalino.....	19
6.8	Pelambre.....	19
6.9	Aplicaciones de la queratina	19
7	MATERIALES Y MÉTODOS	21
7.1	Materiales.....	21
7.2	Extracción de queratina.....	21
7.2.1	Proceso de extracción alcalina	21
7.3	Purificación.....	22
7.3.1	Diálisis de queratina	22
7.4	Caracterización físico -química	22
7.4.1	Determinación de pH.....	22
7.4.2	Color CIELAB	22
7.4.3	Viscosidad	22
7.4.4	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	22
7.4.5	Determinación de peso molecular SDS-PAGE.....	23
8	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	24
8.1	Proceso de extracción de queratina por método alcalino.....	24
8.2	Caracterización fisicoquímica.....	25
8.2.1	Determinación de pH.....	25
8.2.2	Determinación de color.....	26
8.2.3	Viscosidad	27

8.2.4	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	29
8.2.5	Determinación de peso molecular SDS-PAGE	30
9	CONCLUSIONES	33
10	BIBLIOGRAFÍA.....	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Determinación de pH en pelambre.....	25
Tabla 2. Determinación de color en pelambre.	27
Tabla 3. Determinación de viscosidad en el pelambre.....	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fibra del pelo observada al microscopio, mostrando la cutícula y escamas. obtenido de (Helman, 1969).	10
Figura 2. Corte transversal de la fibra donde se observan la cutícula y células del córtex. Adaptado de Helman (1969).....	11
Figura 3. Estructura interna de la fibra de pelo, incluyendo médula, córtex y cutícula. Adaptado de Simpson and Crawshaw (2002).	12
Figura 4. Representación estructural de la queratina(Lopez & Benítez, 2015). ...	14
Figura 5. Estructura primaria de la queratina, representada como una cadena lineal de aminoácidos. Retomado de (Cárdenas Echerres & Ibarra Gutiérrez, 2022). .	15
Figura 6. Estructura secundaria de la queratina, mostrando la formación de hélices estabilizadas por puentes de hidrógeno. Retomado de (Saha et al., 2019).	16
Figura 7. Estructura terciaria de la queratina, correspondiente al plegamiento tridimensional de la proteína Retomado de (Kajava et al., 2006).	17
Figura 8. Representación de la reacción de hidrólisis de la queratina, incluyendo la ruptura de enlaces disulfuro (Lopez & Benítez, 2015).....	18
Figura 9. Determinación de grupos funcionales en las muestras.	30

ABREVIATURAS

ATR	Reflectancia total atenuada
CaOH ₂	Cal apagada
cP	Centipoise
DES	Disolvente eutéctico profundo
DRX	Difracción de rayos X
FTIR	Espectroscopia por transformada de Fourier
kDa	Kilodaltones
MEB	Microscopía electrónica de barrido
NaOH	Hidróxido de Sodio
Na ₂ S	Sulfuro de Sodio
pH	Potencial de Hidrógeno
SDS-PAGE	Electroforesis en gel de poliacrilamida con dodecilsulfato sódico
S-S	Enlaces disulfuro
TG/DSC	Análisis térmico simultaneo con calorimetría diferencial de barrido
μm	Micrómetros

RESUMEN

La industria del cuero, aunque es una de las más importantes económicamente, es la que más genera altos niveles de contaminación debido a la producción de residuos, entre los cuales el pelo representa uno de los subproductos con alto nivel de afluencia volviéndose el contaminante número uno. Este subproducto a pesar de su alto nivel de contaminación contiene grandes cantidades de queratina, una proteína fibrosa de alto valor con aplicaciones en sectores como la cosmética, la industria de materiales y en la medicina lo que la convierte en una alternativa viable para el aprovechamiento de desechos. Derivado de lo anterior, y considerando la problemática que representa este subproducto, el presente trabajo tuvo como objetivo la extracción y caracterización de queratina a partir de pelo de conejo mediante hidrólisis alcalina, con el propósito de otorgar un valor agregado a un residuo generado en la industria de la curtiduría.

Para ello se empleó un proceso de hidrólisis alcalina utilizando hidróxido de calcio y sulfuro de sodio durante la etapa de pelambre, seguido de filtración, neutralización y purificación mediante diálisis. La queratina obtenida fue posteriormente caracterizada a través de análisis fisicoquímicos (pH, color y viscosidad) y mediante técnicas instrumentales como espectroscopía FTIR y electroforesis SDS-PAGE, con el propósito de evaluar sus propiedades y confirmar su obtención. Los resultados revelaron que el proceso alcalino permitió la eliminación efectiva del pelo y la liberación de compuestos proteicos. Se observó que el pH influye de manera significativa en las propiedades de las soluciones de queratina: bajo condiciones neutras se favorece una mayor estabilidad, viscosidad y dispersión, mientras que en condiciones altamente alcalinas se generan sistemas más turbios y menos estables. Asimismo, el análisis FTIR mostró la presencia de grupos funcionales característicos de proteínas, y el SDS-PAGE evidenció fracciones de bajo peso molecular, lo que indica una queratina parcialmente hidrolizada.

ABSTRACT

The leather industry, although one of the most economically significant, is also the one that generates the highest levels of pollution due to waste production; among these wastes, hair is one of the most abundant byproducts, making it the number one pollutant. Despite its high pollution potential, this byproduct contains large amounts of keratin, a high-value fibrous protein with applications in sectors such as cosmetics, the materials industry, and medicine, making it a viable alternative for waste utilization. Given the above, and considering the challenges posed by this byproduct, the objective of this study was to extract and characterize keratin from rabbit hair using alkaline hydrolysis, with the aim of adding value to a waste product generated by the tanning industry.

To this end, an alkaline hydrolysis process was employed using calcium hydroxide and sodium sulfide during the skinning stage, followed by filtration, neutralization, and purification via dialysis. The keratin obtained was subsequently characterized through physicochemical analyses (pH, color, and viscosity) and instrumental techniques such as FTIR spectroscopy and SDS-PAGE electrophoresis, to evaluate its properties and confirm its isolation. The results revealed that the alkaline process effectively removed the hair and released protein compounds. It was observed that pH significantly influences the properties of keratin solutions: under neutral conditions, greater stability, viscosity, and dispersion are promoted, whereas under highly alkaline conditions, more turbid and less stable systems are formed. Likewise, FTIR analysis revealed the presence of functional groups characteristic of proteins, and SDS-PAGE showed low-molecular-weight fractions, indicating partially hydrolyzed keratin.

1 INTRODUCCIÓN

En México, la industria del cuero se considera uno de los sectores productivos más importantes, debido a su alta producción de productos de uso cotidiano. Aunado a eso, esta industria se caracteriza por generar altos niveles de contaminación, debido principalmente a la gran cantidad de residuos que se producen durante sus procesos. El pelo representa uno de los subproductos más relevantes al mismo tiempo que se considera una de las principales problemáticas ambientales. Este residuo se obtiene durante el proceso de pelambre alcalino o pelambre convencional, en el que se emplean sustancias químicas como el sulfuro y el hidróxido de calcio. Es importante mencionar que el pelo contiene una proteína de alto valor denominada queratina, la cual puede ser aprovechada y generar un valor agregado (Numpaqué P. & Viteri R., 2016).

De acuerdo a lo reportado por Ferraro (2016), el procesamiento de animales terrestres y acuáticos destinados al consumo humano genera grandes volúmenes de residuos, estimándose una producción mundial de entre 20 y 100 millones de toneladas de descartes. Subproductos como la lana que de igual manera es considerada un residuo de la ganadería ovina, están compuestos principalmente por queratina, este compuesto puede ser aplicado en la industria cosmética, biotecnológica y médica (S. Mattiello et al., 2022). En este sentido, el uso de residuos animales se considera una alternativa viable y rentable, ya que permite obtener biomoléculas que pueden ser reutilizadas en distintos sectores (Chaitanya Reddy et al., 2021).

La queratina puede obtenerse a partir de diversos residuos pecuarios como; plumas de aves, lana y pelos porcinos, estos representan aproximadamente el 90 % de su peso, por ello su importancia para procesos de recuperación y aprovechamiento industrial (Kamarudin et al., 2017). Esto responde a una tendencia global; por ejemplo, en 2020 se generaron alrededor de 12 millones de toneladas de subproductos animales ricos en queratina (S. Banasaz & V. Ferraro, 2024).

La queratina es una proteína fibrosa ampliamente distribuida en los apéndices de diversos animales, como pelo, lana, uñas, plumas y epidermis. Se distingue por su alto contenido de cisteína, lo que le confiere una elevada resistencia mecánica en comparación con otras proteínas fibrosas como la elastina y el colágeno. Junto con este último, la queratina constituye uno de los biopolímeros más importantes presentes en los organismos animales (S. Banasaz & V. Ferraro, 2024). Estas estructuras queratinizadas se localizan en la capa externa de la piel (epidermis) y se desarrollan hacia el exterior formando fibras como el pelo o la lana, lo que explica su presencia en diversos residuos biológicos.

Debido a sus propiedades estructurales y funcionales, la queratina ha generado un gran interés como fuente de biomateriales renovables con aplicaciones en medicina, cosmética e industriales (J. Wang et al., 2025). Su aprovechamiento contribuye a la recuperación de compuestos de alto valor a partir de desechos (Ferraro et al., 2016). Sin embargo, los métodos tradicionales de extracción de queratina presentan limitaciones ambientales y riesgos para la salud, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles, como el uso de solventes eutécticos profundos (DES) (Pääkkönen, Rissanen, Ora, & Anugwom, 2025).

Como se menciona anteriormente, el pelo de conejo tiene un alto potencial de queratina, ya que contiene una gran cantidad de esta proteína estructural, esta se encuentra en las células epiteliales y su función principal es proporcionar resistencia y protección. Entre sus principales funciones destaca la formación de una barrera frente a daños externos, actuando como un mecanismo de protección en estructuras como el pelo, las uñas, los cuernos y las plumas (Sara Mattiello et al., 2023a). Esta proteína que además es rica en azufre, constituye el componente principal de las capas más externas de la epidermis de los vertebrados, así como de otros tejidos derivados del ectodermo (Marín, 2014).

OBJETIVO PARTICULAR

Extraer y caracterizar queratina del pelo de conejo mediante hidrólisis alcalina, con el fin de valorizar el residuo generado en el proceso de pelambre de la industria de la curtiduría.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Extraer la queratina presente en el pelo de conejo mediante hidrólisis alcalina para evaluar sus propiedades fisicoquímicas.
- Caracterizar los extractos obtenidos obtenida mediante análisis fisicoquímicos (color, pH y viscosidad) y técnicas instrumentales como FT-IR y SDS-PAGE, con el fin de corroborar la obtención de queratina.

2 HIPÓTESIS

La hidrólisis alcalina permitirá la extracción de queratina a partir del pelo residual de la industria de la curtiduría, obteniendo propiedades fisicoquímicas adecuadas para darle valor agregado.

3 ANTECEDENTES

La queratina comenzó a estudiarse en la literatura científica a partir de 1850, cuando despertó el interés de los investigadores debido a su comportamiento distinto al de otras proteínas. En particular, los métodos convencionales para la disolución de proteínas resultaban ineficaces para solubilizar la queratina. Aunque técnicas como la quema y la molienda ya eran conocidas, el interés principal se centraba en desarrollar métodos que permitieran disolver materiales ricos en queratina, como el pelo y los cuernos, con el fin de obtener productos de mayor valor. Un avance significativo ocurrió en 1905, cuando John Hoffmeier obtuvo una patente en Estados Unidos que describía un proceso para extraer queratina de cuernos de animales mediante el uso de cal. Las queratinas obtenidas se emplearon en la elaboración de geles que podían reforzarse mediante la adición de formaldehído (Rouse and Van Dyke).

Diversos estudios han reportado la extracción de queratina mediante el uso de diferentes metodologías, permitiendo identificar condiciones viables y propiedades relevantes de esta proteína. Fernández y colaboradores (2016), reportan la extracción de queratina a partir de lana de borrego mediante el uso de ácido tioglicólico en medio básico, identificaron rendimientos de disolución cercanos al 51 % en masa y analizaron la evolución morfológica de las fibras mediante microscopía óptica. Esto les permitió determinar propiedades como; el peso molecular, el radio de giro y el segundo coeficiente viral mediante dispersión estática de luz. Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la queratina obtenida presentó bandas características en espectros de infrarrojo similares a otras proteínas y que, al mezclarse con glicerol, puede formar materiales con distintas propiedades mecánicas.

Orjuela Palacio y colaboradores (2021), propusieron una metodología utilizando una hidrólisis alcalina con hidróxido de sodio para la extracción de queratina a partir de plumas de pollo. Los autores concluyeron que el Hidróxido de Sodio (NaOH) puede sustituir a los agentes reductores tradicionales, ofreciendo una alternativa más

económica y con menor impacto ambiental, lo que favorece su posible aplicación a nivel industrial. Este enfoque es importante en este estudio ya que respalda el uso de la hidrólisis alcalina como un método eficiente de extracción.

Wang (2018) reportó la extracción de queratina a partir de pelo de conejo utilizando una mezcla de L-cisteína y urea a pH 10.5, a una temperatura de 75 °C durante 5 horas. Bajo estas condiciones, obtuvieron queratina con un peso molecular aproximado de 11 kDa. Posteriormente, desarrolló una metodología alternativa basada en el uso de disolventes eutécticos profundos, mediante combinaciones de cloruro de colina con urea, etilenglicol, ácido cítrico y ácido oxálico en diferentes proporciones molares. Sus resultados mostraron que la solubilidad del pelo de conejo varía según el sistema utilizado, alcanzando valores de hasta 71 % en el sistema cloruro de colina–ácido oxálico. Por otra parte, reportaron que el aumento en el tiempo y la temperatura de tratamiento favorece la solubilidad del material.

Debido a esto, Wang (2018) generó un sistema basado en cloruro de colina y ácido oxálico en proporción molar 1:2, este sistema mostró una mejor disolución del pelo. La queratina obtenida en este trabajo fue purificada mediante diálisis, filtración y liofilización. Posteriormente, fue caracterizada mediante técnicas, como espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR), difracción de rayos X (DRX), análisis termo gravimétrico (TG/DSC), electroforesis de proteínas, microscopía electrónica de barrido (MEB) y análisis de aminoácidos.

A pesar de los avances reportados en la literatura sobre la extracción de queratina a partir de distintos residuos animales y el uso de diversas metodologías, aún existen limitaciones relacionadas con la eficiencia de los procesos, el impacto ambiental de los reactivos utilizados y la variabilidad en las propiedades del producto obtenido. Aunque se han estudiado diferentes fuentes de queratina, el aprovechamiento del pelo de conejo como materia prima ha sido menos explorado en comparación con otros residuos como plumas o lana.

Además, algunos métodos de extracción han requerido condiciones complejas, así como el uso de agentes químicos de alto costo que generan subproductos que afectan el medio ambiente, limitando su aplicación a gran escala. Por ello, resulta

necesario continuar investigando alternativas que permitan obtener queratina de manera eficiente, económica y con menor impacto ambiental.

En este sentido, la presente investigación se enfoca en la extracción de queratina a partir del pelo residual de conejo mediante hidrólisis alcalina, con el propósito de evaluar su rendimiento y sus propiedades fisicoquímicas, así como su potencial aprovechamiento como biomaterial. De esta manera, se contribuye al aprovechamiento de residuos generados en la industria de la curtiduría y que permitan aportar un valor agregado.

4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de la curtiduría representa una actividad económica relevante a su vez, es una de las principales fuentes de contaminación debido a la gran cantidad de residuos sólidos y líquidos que genera durante sus procesos (Numpaqué P. & Viteri R., 2016). Uno de los residuos más abundantes es el pelo obtenido durante la etapa de pelambre, este generalmente es desechado sin un aprovechamiento adecuado, contribuyendo a problemas ambientales.

Estos residuos sólidos y líquidos pueden contener una alta cantidad de queratina, una proteína de alto valor con potencial aplicación en áreas como la biotecnología, la industria cosmética y la elaboración de biomateriales (S. Mattiello et al., 2022). Su aprovechamiento se ve limitado por los distintos métodos de extracción, ya que la queratina presenta una estructura altamente estable y resistente a la solubilización mediante métodos convencionales.

En la actualidad, existen diversos métodos para la extracción de esta proteína, tal es el caso del uso de, ácidos, agentes reductores o disolventes especiales; estos procesos implican el uso de sustancias químicas costosas, condiciones complejas o generan impactos negativos al medio ambiente (Chaitanya Reddy et al., 2021). Por ello, resulta necesario explorar alternativas más accesibles y eficientes que permitan la recuperación de esta proteína a partir de residuos.

En este contexto, la hidrólisis alcalina se presenta como una posible alternativa para la extracción de queratina, debido a su relativa simplicidad y menor costo en comparación con otros métodos (Orjuela Palacio & Zaritzky, 2021). Sin embargo, aún es necesario evaluar su eficiencia en la obtención de queratina a partir del pelo residual de conejo, así como analizar las propiedades del producto obtenido para determinar su posible aprovechamiento.

Por lo anterior, surge la necesidad de investigar si la hidrólisis alcalina permite extraer queratina en condiciones adecuadas de rendimiento y calidad a partir del pelo residual de la industria de la curtiduría, con el fin de contribuir al aprovechamiento de este residuo y reducir su impacto ambiental.

5 JUSTIFICACIÓN

Desde el punto de vista científico-tecnológico, el pelo de conejo representa una fuente rica en queratina con propiedades funcionales que han sido aprovechadas en aplicaciones biomédicas, agroindustriales y en la ciencia de materiales (Chilakamarry et al., 2021). Esta proteína se caracteriza por su alto contenido de cisteína y la presencia de enlaces disulfuro, lo que le confiere propiedades de resistencia, elasticidad y biocompatibilidad (X. Wang, Shi, Zhao, & Yun, 2021a). Debido a estas características, la queratina tiene aplicaciones en diversos campos, como la elaboración de hidrogeles, bioplásticos, fertilizantes nitrogenados, recubrimientos y materiales biomédicos (Chilakamarry et al., 2021).

En este contexto, el desarrollo de protocolos de extracción optimizados permite transformar un residuo en un insumo de alto valor industrial y científico, favoreciendo la diversificación productiva y promoviendo la innovación tecnológica a nivel regional, particularmente en el estado de Hidalgo.

Asimismo, la extracción y aprovechamiento de queratina a partir del pelo de conejo puede generar múltiples beneficios, tales como la reducción de residuos orgánicos, la diversificación de ingresos para productores cunícolas, el desarrollo de cadenas de valor locales y la generación de conocimiento aplicado con potencial de transferencia tecnológica (Chen et al., 2022).

Por lo anterior, esta investigación se considera funcional para el estado de Hidalgo, ya que aborda una problemática local relacionada con los residuos de la cunicultura, aprovecha un recurso disponible en la región y propone una alternativa con potencial de escalamiento y beneficio socioeconómico. Además, se espera que este estudio también contribuya al desarrollo de un método de extracción de queratina mediante hidrólisis alcalina eficiente, económicamente viable y con un menor impacto ambiental, facilitando así su posible implementación en la industria de la curtiduría.

6 MARCO TEÓRICO

6.1 Pelo

El pelo es uno de los componentes más importantes de la piel, ya que cubre gran parte de su superficie corporal. Entre sus principales funciones destacan la protección contra agentes externos, la participación en la percepción sensorial y la dispersión de secreciones provenientes de las glándulas sebáceas (J. M. Adzet, (1995)).

6.2 Anatomía y estructura del pelo

6.2.1 Estructura física del pelo

La estructura física del pelo se divide en dos partes: la estructura superficial y estructura interna (Shahin Banasaz & Vincenza Ferraro, 2024).

6.2.1.1 Estructura Superficial

La estructura superficial de la fibra capilar está conformada por diversas capas que le proporcionan protección. Helman (1969), mediante observaciones microscópicas, describió la presencia de una capa protectora formada por escamas superpuestas y organizadas de manera ordenada (Figura 1).

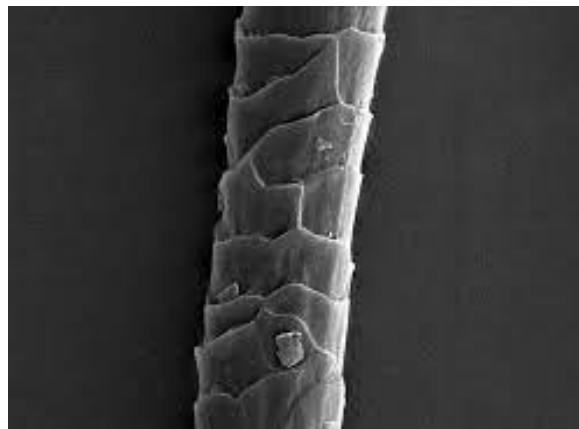


Figura 1. Fibra del pelo observada al microscopio, mostrando la cutícula y escamas. obtenido de (Helman, 1969).

Asimismo, una de las principales características de la fibra capilar es la cutícula (Figura 2), la cual se distingue por su dureza y composición química, ya que protege

la fibra frente a agentes externos. Además, presenta una capa de naturaleza lipídica que limita la entrada de agua, aunque permite la absorción de vapor (Elvira, 2009).

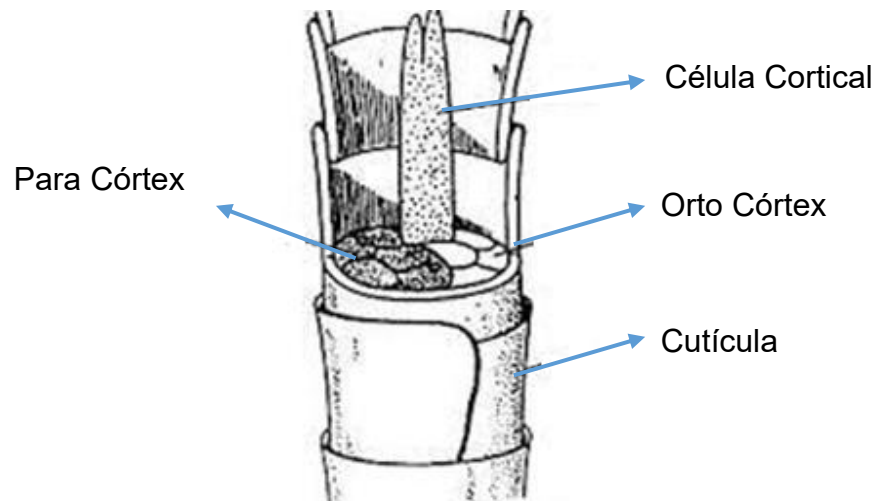


Figura 2. Corte transversal de la fibra donde se observan la cutícula y células del córtex. Adaptado de Helman (1969).

6.2.1.1.1 La cutícula

La cutícula está formada por escamas que recubren la fibra capilar y se divide en tres capas: epicutícula: Es la capa más externa y delgada, compuesta principalmente por polisacáridos. Proporciona resistencia química y dificulta la penetración de sustancias hacia el interior del pelo, exocutícula: Es la región más queratinizada, con alto contenido de proteínas sulfuradas y endocutícula: Se localiza en la parte interna de las escamas y presenta menor grado de queratinización, por lo que es más susceptible a daños por agentes químicos como ácidos y álcalis (J. M. A. Adzet, 1995).

6.2.1.2 Estructura Interna

La estructura interna de la fibra capilar se compone de diferentes regiones tal como se muestra en la figura 3.

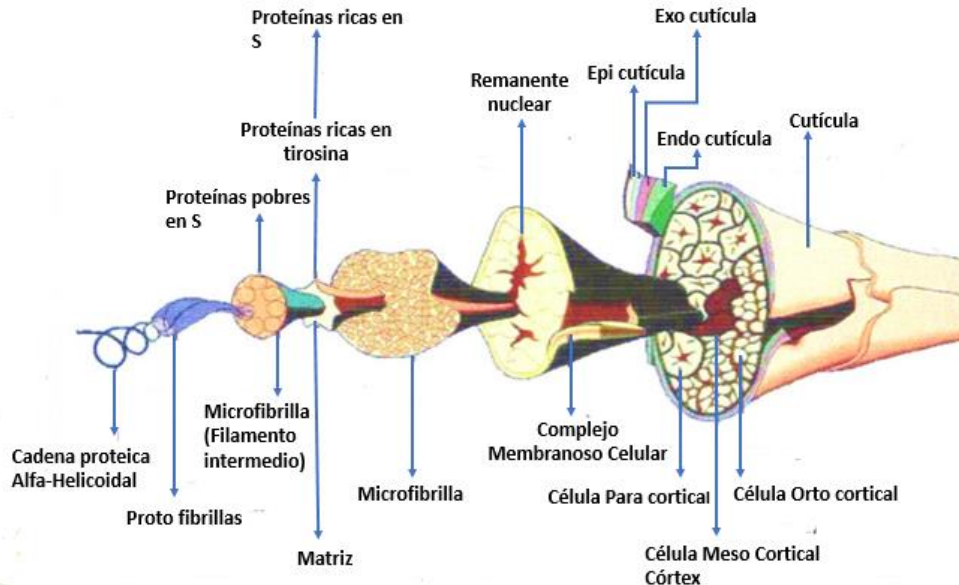


Figura 3. Estructura interna de la fibra de pelo, incluyendo médula, córtex y cutícula. Adaptado de Simpson and Crawshaw (2002).

6.2.1.2.1 El córtex

El córtex constituye la mayor parte de la fibra capilar y es responsable de su resistencia mecánica. Está formado por células fusiformes con longitudes aproximadas de 80 a 100 μm y anchuras de 2 a 5 μm , organizadas en una estructura cristalina. Estas células contienen fibrillas estructurales organizadas jerárquicamente en macro fibrillas y micro fibrillas, dentro de las cuales se encuentra la estructura de hélice alfa característica de la queratina. Las micro fibrillas presentan bajo contenido de azufre y están rodeadas por una matriz amorfa rica en este elemento, lo que influye en las propiedades mecánicas, particularmente en la elasticidad (J. M. A. Adzet, 1995).

El córtex de la fibra capilar está constituido por dos fases principales: el orto córtex y el para córtex. El orto córtex se caracteriza por presentar mayor actividad química, mientras que el para córtex es más estable, posee un mayor contenido de cistina, puede contener melanina en fibras pigmentadas y presenta menor higroscopicidad.

Una diferencia relevante entre ambas fases radica en su proporción, la cual no es constante y, en muchos casos, no presenta un límite de separación claramente definido. Además, el orto córtex y el para córtex se disponen en forma helicoidal, uno sobre otro, lo que contribuye al equilibrio estructural de la fibra. Sin embargo, este equilibrio puede modificarse cuando la fibra es sometida a tensión o a condiciones de humedad. Asimismo, las diferencias en elasticidad e higroscopicidad entre ambas fases influyen en el comportamiento físico de la fibra, particularmente en la formación de su rizado (J. M. A. Adzet, 1995).

6.2.1.2.2 La médula

La médula está formada por células poliédricas que pueden contener burbujas de aire y, en algunos casos, gránulos de pigmento. Generalmente, no está presente en la punta del pelo; su presencia puede indicar que la fibra aún se encuentra en fase de crecimiento. En algunas fibras, la médula puede presentarse de forma discontinua o incluso estar ausente. Asimismo, en fibras más finas, la cantidad de médula tiende a ser menor (J. M. A. Adzet, 1995).

6.2.2 Estructura química del pelo

El pelo es una fibra proteica compuesta principalmente por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Su alto contenido de azufre es una característica distintiva en comparación con otras proteínas. Esta composición se debe principalmente a la presencia del aminoácido cistina, cuyos enlaces disulfuro contribuyen a la estabilidad y resistencia de la estructura capilar (J. M. A. Adzet, 1995).

6.3 Queratina

La queratina es una proteína estructural tridimensional abundante en las células epiteliales, cuya función principal es proporcionar dureza y resistencia. Actúa como una barrera protectora frente a daños externos y es un componente fundamental del pelo, uñas, plumas y cuernos (Sara Mattiello et al., 2023a).

Es una proteína que cuenta con una estructura fibrosa que es rica en azufre, esta misma es el componente principal que forman las capas más externas de la

epidermis de los vertebrados y de otros órganos derivados del ectodermo (Marín, 2014) (figura 4).

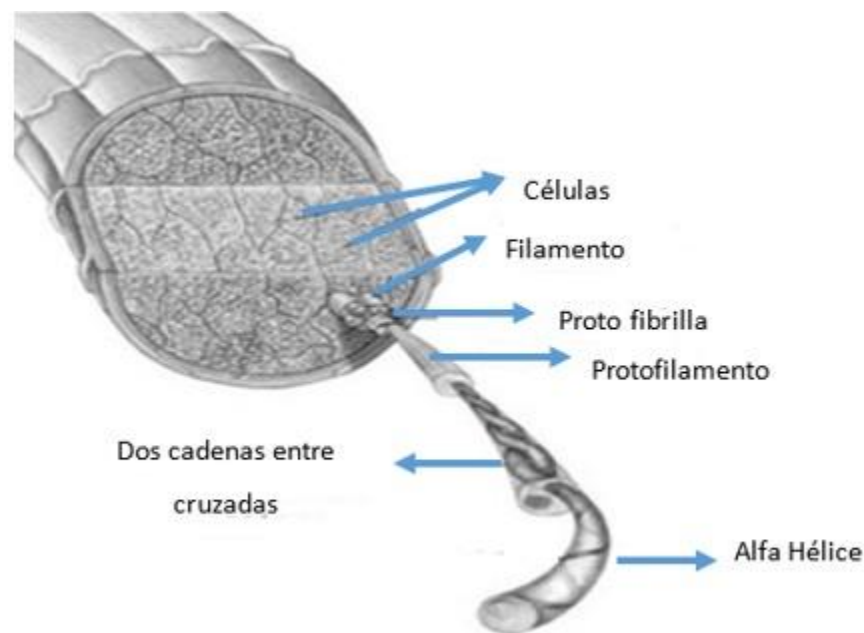


Figura 4. Representación estructural de la queratina(Lopez & Benítez, 2015).

6.3.1 Tipos de queratina

Existen dos tipos principales de queratina: queratina α (alfa): Presente en el pelo, lana, piel y uñas. Se caracteriza por su estructura helicoidal y por la presencia de enlaces disulfuro que le confieren resistencia y queratina β (beta): Presente en plumas, garras, picos y seda de araña. Presenta menor contenido de cisteína y, por tanto, menos enlaces disulfuro (Marín, 2014).

6.4 Estructura de la queratina

La queratina es una proteína estructural que proporciona resistencia y rigidez al cabello, siendo un componente fundamental en la conformación del tallo capilar. Su organización estructural le permite formar una barrera protectora que contribuye a la firmeza y estabilidad de la fibra, a pesar de su reducido espesor. De acuerdo con Cárdenas Echerres y Ibarra Gutiérrez (2022), la queratina presenta diferentes niveles estructurales que determinan sus propiedades físicas y biológicas, los cuales se clasifican en estructura primaria, secundaria y terciaria.

6.4.1 Estructura primaria

Como se ilustra en la figura 5, la estructura primaria corresponde a la secuencia lineal de aminoácidos que conforman la cadena poli peptídica. Esta organización es fundamental, ya que cualquier modificación en la secuencia puede provocar cambios en la conformación tridimensional de la proteína y, en consecuencia, afectar su función biológica (Cárdenas Echerres & Ibarra Gutiérrez, 2022).

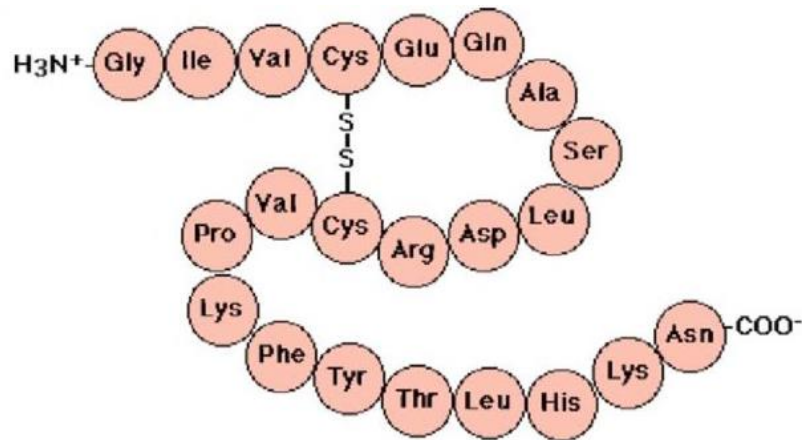


Figura 5. Estructura primaria de la queratina, representada como una cadena lineal de aminoácidos. Retomado de (Cárdenas Echerres & Ibarra Gutiérrez, 2022).

6.4.2 Estructura secundaria

La figura 6 muestra que la estructura secundaria se origina a partir de interacciones locales entre los aminoácidos de la cadena poli peptídica, principalmente mediante la formación de puentes de hidrógeno. En el caso de la queratina, esta organización da lugar a estructuras helicoidales, como la hélice alfa, que contribuyen a la estabilidad de la proteína. Estas interacciones permiten que la cadena de aminoácidos adopte configuraciones específicas que son esenciales para sus propiedades mecánicas (Saha, Arshad, Zubair, & Ullah, 2019).

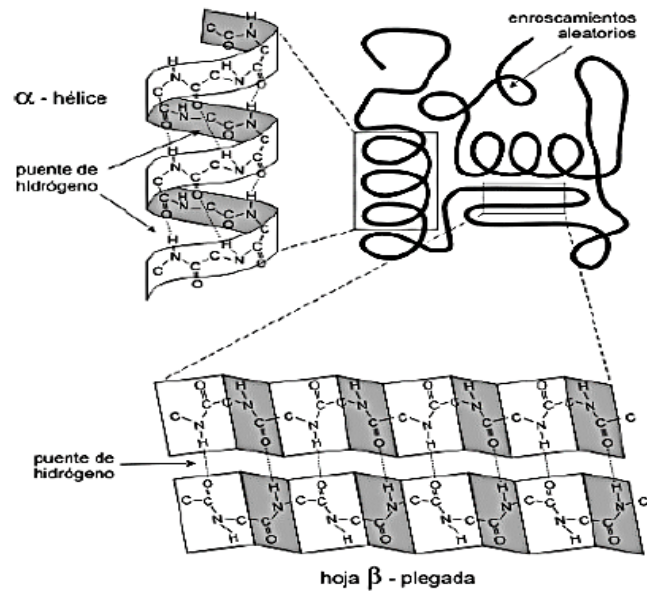


Figura 6. Estructura secundaria de la queratina, mostrando la formación de hélices estabilizadas por puentes de hidrógeno. Retomado de (Saha et al., 2019).

6.4.3 Estructura terciaria

La figura 7 ilustra que la estructura terciaria corresponde al plegamiento tridimensional de la cadena polipeptídica, el cual se produce debido a las interacciones entre los grupos laterales (grupos R) de los aminoácidos. Estas interacciones incluyen enlaces disulfuro, fuerzas electrostáticas y fuerzas de Van der Waals, que en conjunto determinan la forma final de la proteína. Esta conformación tridimensional es esencial para la resistencia y funcionalidad de la queratina (Kajava, Squire, & Parry, 2006).

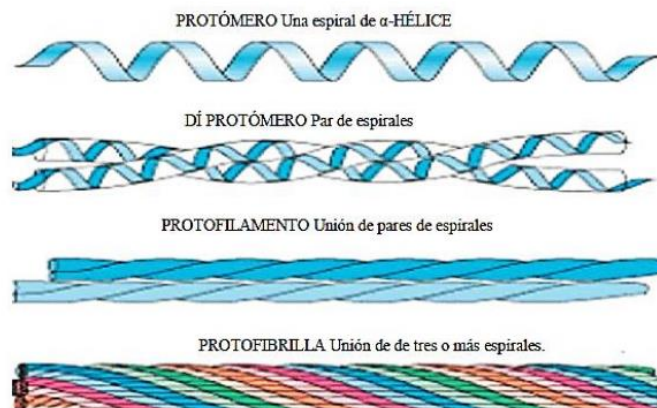


Figura 7. Estructura terciaria de la queratina, correspondiente al plegamiento tridimensional de la proteína Retomado de (Kajava et al., 2006).

6.5 Composición fisicoquímica de la queratina

La queratina pertenece al grupo de las escleroproteínas fibrosas y se caracteriza por su alto contenido de azufre, debido principalmente a la presencia del aminoácido cisteína. Entre sus principales propiedades fisicoquímicas se destacan: es insoluble en agua fría y presenta resistencia frente a ácidos y bases diluidas, es resistente a la acción de enzimas proteolíticas, su elevada resistencia mecánica se debe a la presencia de enlaces disulfuro (puentes covalentes) entre cadenas polipeptídicas y su estabilidad estructural está directamente relacionada con su composición molecular y su alto contenido de cistina (Sara Mattiello et al., 2023a).

6.6 Degradación de la queratina

La degradación de la queratina comprende una serie de procesos químicos mediante los cuales su estructura compleja es descompuesta en componentes más simples. Debido a su alta estabilidad, derivada de la presencia de enlaces disulfuro, este proceso requiere condiciones específicas que permitan la ruptura de dichos enlaces (X. Wang et al., 2021a).

6.6.1 Hidrolisis de la queratina

La hidrólisis de la queratina es un proceso químico mediante el cual se rompen enlaces presentes en la estructura proteica, principalmente enlaces peptídicos y, bajo ciertas condiciones, enlaces disulfuro. Este proceso conduce a la formación de compuestos de menor peso molecular, como péptidos y aminoácidos solubles. Durante la hidrólisis, los enlaces disulfuro de la cistina pueden romperse, generando compuestos como la cisteína y derivados oxidados, lo que contribuye a la desestabilización de la estructura proteica (Cárdenas Echerres & Ibarra Gutiérrez, 2022) tal como se muestra en la Figura 8 .

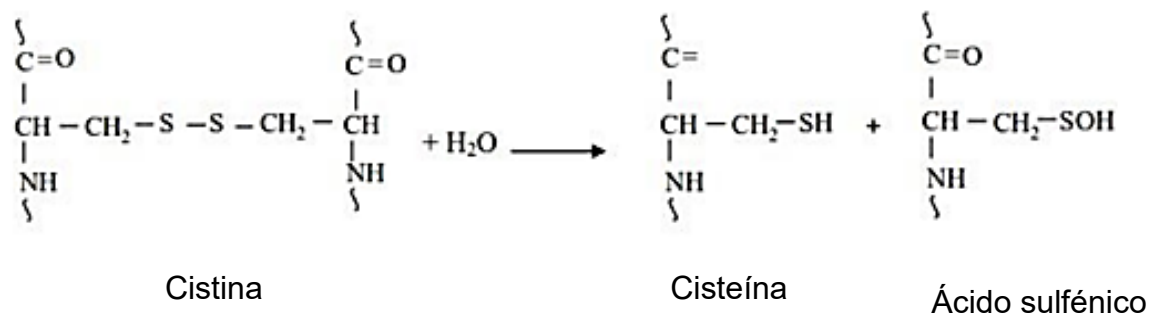


Figura 8. Representación de la reacción de hidrólisis de la queratina, incluyendo la ruptura de enlaces disulfuro (Lopez & Benítez, 2015).

6.7 Métodos de extracción de queratina

La extracción de queratina a partir de fibras proteicas puede realizarse mediante diferentes métodos químicos, los cuales buscan romper la estructura altamente reticulada de esta proteína para obtener productos solubles (X. Wang et al., 2021a).

6.7.1 Método ácido

El método ácido consiste en la aplicación de soluciones ácidas que promueven la ruptura de enlaces disulfuro (S-S) y, en menor medida, de enlaces peptídicos presentes en la queratina. Este proceso permite obtener productos ricos en aminoácidos que contienen azufre, como la cisteína, así como compuestos derivados de la glutamina y el ácido glutámico (Giteru et al., 2023).

6.7.2 Método alcalino

Pasković et al. (2024) describen la hidrólisis alcalina como un proceso químico en el cual se utiliza soluciones concentradas de hidróxidos para romper los enlaces peptídicos los cuales unen las cadenas de aminoácidos de una proteína, el hidróxido ataca los carbonilos de los enlaces peptídicos produciendo la ruptura de la cadena liberando fragmentos proteicos más pequeños como son los péptidos, aminoácidos y sales. A diferencia de otras proteínas Gousterova y colaboradores (2005) mencionan que la queratina al tener una estructura altamente reticulada por enlaces de disulfuro necesita de condiciones más enérgicas en la hidrólisis, en las cuales ocurren principalmente dos mecanismos: la ruptura de enlaces disulfuro, que conduce a la formación de grupos sulfhidrilo o compuestos oxidados solubles, debilitando la estructura de la proteína y la hidrólisis de enlaces peptídicos, que fragmenta progresivamente las cadenas poli peptídicas, generando queratina hidrolizada, péptidos de bajo peso molecular y aminoácidos libres .

6.8 Pelambre

El pelambre es un proceso utilizado principalmente en la industria del curtido, cuyo objetivo es la eliminación del pelo, raíces y epidermis de las pieles. Para llevarlo a cabo, se emplean compuestos químicos como el sulfuro de sodio (Na_2S) y la cal apagada (CaOH_2). El proceso consiste en una etapa inicial en la que la queratina del pelo es tratada con cal, lo que facilita su posterior degradación. Posteriormente, se adicionan compuestos sulfurados que atacan las raíces del pelo, permitiendo su desprendimiento sin causar un daño significativo a la estructura externa de la fibra. Una vez eliminado el pelo, es recomendable separarlo rápidamente del medio de reacción para evitar su degradación continua (Ministerio de Industria, s.f.).

6.9 Aplicaciones de la queratina

La queratina presenta diversas aplicaciones en distintos sectores industriales. En el ámbito textil, se utiliza como material de refuerzo en productos derivados de papel y cartón, así como en la fabricación de compuestos poliméricos con polietileno y polipropileno. Asimismo, tiene aplicaciones en la elaboración de biomateriales debido a sus propiedades estructurales (Cárdenas Echerres & Ibarra Gutiérrez,

2022). En el campo de la cosmetología, la queratina es ampliamente utilizada en tratamientos capilares, donde contribuye a mejorar la apariencia del cabello, aportando brillo, suavidad y resistencia. Estos tratamientos actúan principalmente recubriendo y fortaleciendo la fibra capilar, especialmente cuando ha sido dañada por factores químicos, mecánicos o ambientales (Oviedo Zegarra, 2019).

7 MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Materiales

Las pieles utilizadas en este estudio fueron obtenidas de conejos de distintas razas criados en el estado de Hidalgo, específicamente en el municipio de Tulancingo. Dichas pieles fueron donadas a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y procesadas en el Laboratorio de Tecnología del Cuero.

7.2 Extracción de queratina

7.2.1 Proceso de extracción alcalina

Para la extracción de queratina se emplearon pieles en estado de conservación salado. Inicialmente, las pieles fueron sometidas a un proceso de humectación, seguido de la eliminación de impurezas mediante la aplicación de tensoactivos y detergentes, con el objetivo de reducir la carga microbiana. Posteriormente, se realizó un enjuague para eliminar el exceso de agua residual. Una vez limpias, las pieles fueron introducidas en un tambor de curtido para llevar a cabo el proceso de pelambre, técnica ampliamente utilizada en la industria de la curtiduría. Este tratamiento promueve la hidrólisis alcalina de los componentes de la piel, facilitando la separación del pelo, raíces y parte de la epidermis.

Para ello, se adicionó una mezcla compuesta por 200% de agua, 8% de cal y 4% de sulfuro de sodio, manteniendo el sistema en agitación durante 24 horas. Este proceso permitió la ruptura de los enlaces proteicos responsables de la fijación del pelo a la dermis. Al finalizar, se verificó la completa eliminación del pelo, así como la ausencia de restos de raíz. El baño residual generado durante el proceso de pelambre fue recolectado para su posterior tratamiento, debido a su carácter altamente alcalino (pH 12–13). Posteriormente, el baño fue filtrado mediante papel filtro para eliminar sólidos en suspensión. Para su neutralización, se tomaron 60 mL del baño residual y se ajustó el pH mediante la adición gradual de ácido clorhídrico, hasta alcanzar un valor cercano a la neutralidad, asegurando condiciones adecuadas para su manejo y análisis.

7.3 Purificación

7.3.1 Diálisis de queratina

La purificación de la queratina se llevó a cabo mediante un proceso de diálisis utilizando membranas con un rango de corte de 8 a 10 kDa. Las membranas fueron llenadas con el baño residual previamente neutralizado y posteriormente colocadas en un vaso de precipitados de 600 mL que contenía agua destilada. Se utilizó agitación magnética continua, asegurando que las membranas no estuvieran en contacto con el fondo del recipiente. El proceso de diálisis se mantuvo durante 24 horas, realizando tres cambios de agua para favorecer la eliminación de compuestos de bajo peso molecular.

7.4 Caracterización físico -química

7.4.1 Determinación de pH

El pH de las muestras fue determinado mediante un potenciómetro de la marca Hanna Instruments, previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4 y pH 7.

7.4.2 Color CIELAB

La determinación del color se realizó en dos muestras del baño residual de pelambre: una con pH 12 y otra con pH 7. Las mediciones se efectuaron por triplicado utilizando un colorímetro Proconsa, modelo NR110 de alta precisión.

7.4.3 Viscosidad

La viscosidad se determinó utilizando un viscosímetro Brookfield modelo RTV (U.S.A.), empleando la geometría No. 3 a una velocidad de 50 rpm. Los resultados se expresaron en centipoise (cP).

7.4.4 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros de absorción fueron obtenidos mediante un equipo FT-MIR (Perkin Elmer, modelo Frontier) equipado con reflectancia total atenuada (ATR). Las mediciones se realizaron en un intervalo de 4000 a 380 cm^{-1} , a temperatura ambiente. Se recolectaron 3620 escaneos con una resolución de 1 cm^{-1} , y los datos fueron procesados mediante el software Spectrum 10.

7.4.5 Determinación de peso molecular SDS-PAGE

La determinación del peso molecular se realizó mediante electroforesis en gel de poliacrilamida con dodecil sulfato de sodio (SDS-PAGE), siguiendo la metodología descrita por Laemmli, con algunas modificaciones en la concentración de los geles. La electroforesis se llevó a cabo a un voltaje constante de 100 V durante 12 horas, utilizando una fuente de alimentación ENDURO 300 V (Labnet International, Inc.). Posteriormente, los geles fueron teñidos con azul de Coomassie R-250 durante 2 horas, empleando una solución compuesta por metanol al 50% (v/v), ácido acético al 10% (v/v) y colorante al 0.05% (p/v). Finalmente, se realizó el desteñido con una solución de ácido acético al 7.5% (v/v) y metanol al 5% (v/v).

8 RESULTADOS Y DISCUSIONES

8.1 Proceso de extracción de queratina por método alcalino

La extracción de queratina mediante un tratamiento alcalino permitió la eliminación completa del pelo y la separación de la epidermis en las pieles tratadas. Durante el proceso de pelambre, se observó que, después de 48 horas de mantener en constante agitación y reposo, las pieles presentaban una superficie limpia, sin presencia visible de pelo ni restos de raíz. El baño residual obtenido presentó un aspecto turbio, con coloración oscura y presencia de sólidos en suspensión, características propias de este tipo de procesos debido a la liberación de componentes proteicos y otros materiales orgánicos tal como se muestra en la figura 9. Los resultados fueron favorecedores con el tratamiento alcalino sugerido ya que fue eficaz para la ruptura de las estructuras que mantienen el pelo adherido a la dermis, facilitando la liberación de compuestos proteicos, entre ellos la queratina, hacia el medio líquido.



Figura 9. Extracción de queratina por método alcalino.

8.2 Caracterización fisicoquímica

8.2.1 Determinación de pH

La Tabla 1 muestra los valores promedio de pH obtenidos en las dos condiciones evaluadas. La muestra sin neutralizar presentó un pH altamente alcalino (12), característico del proceso de pelambre. Posteriormente, una alícuota de esta misma muestra fue neutralizada con ácido clorhídrico hasta alcanzar un pH neutro (7). La neutralización es importante, ya que permitió obtener condiciones más adecuadas para el manejo y posible aprovechamiento de las proteínas presentes.

Tabla 1. Determinación de pH en pelambre.

Tratamiento	pH
pH 12	11.92 ± 0.32
pH7	7.16 ± 0.10

De acuerdo a lo reportado por Covington (2019), el valor de pH inicial del proceso de pelambre y encalado se encuentra entre 12-13, debido al uso de sustancias alcalinas como sulfuro de sodio y cal para la eliminación del pelo y la apertura de fibras de colágeno. La presencia de un pH alcalino en la muestra inicial implica que la queratina y otras proteínas pueden desnaturalizarse o perder funcionalidad debido a que este medio favorece el desenrollamiento de estructuras secundarias, así como la modificación de la carga superficial de las proteínas y la ruptura de enlaces disulfuro (Shavandi, Silva, Bekhit, & Bekhit, 2017; B. Wang, Yang, McKittrick, & Meyers, 2016). Estas modificaciones reducen la estabilidad estructural y pueden hacer que el material no sea apto para aplicaciones posteriores.

Asimismo, en la industria del cuero, ajustar el pH a valores neutros o ligeramente ácidos se considera una etapa importante ya que permite estabilizar la carga superficial del colágeno y evitar el deterioro (Covington & Wise, 2019). Por ello, el valor final obtenido (pH \approx 7.1) indica que la muestra en un estado químicamente estable facilita su uso en la evaluación en procesos posteriores. Los resultados obtenidos en este trabajo confirman que el pH y los procesos de purificación influyen

significativamente en las propiedades ópticas de las soluciones de queratina. Un pH extremo sin tratamiento posterior tiende a generar sistemas más turbios y con menor luminosidad, mientras que condiciones controladas y procesos de purificación favorecen soluciones más transparentes.

8.2.2 Determinación de color

Los resultados obtenidos en colorimetría por CIELab, mostraron que existen diferencias en los parámetros de color entre ambas muestras, a un pH de 12 se observó un valor de luminosidad (L) ligeramente mayor (23.41) en comparación con la muestra a pH de 7 (22.06) tal como se muestra en la tabla 2. Este comportamiento puede atribuirse a los cambios estructurales de la queratina bajo condiciones alcalinas. De acuerdo a los reportado por Wang y colaboradores (2016), al realizar una extracción en medios alcalinos, se genera una mayor ruptura de enlaces disulfuro, permitiendo la solubilización de la proteína. Estos cambios influyen en la percepción de la luminosidad.

En este sentido, la muestra tratada a pH 7, al neutralizarla presentó condiciones más estables que favorecieron la dispersión homogénea de las proteínas. Estudios como el de J. Barone and Schmidt (2004) reportan que el ajuste de pH y los procesos de purificación permiten obtener soluciones de queratina más uniformes, reflejándose en un cambio de sus propiedades ópticas.

Otros parámetros considerados en esta técnica son; a^* , b^* , C^* y H° . La muestra neutralizada a pH 7, presentó valores más altos en a^* (3.95) y b^* (2.35), indicando una mayor tendencia hacia colores rojizos y amarillentos, respectivamente. El valor de croma (C^*) de igual manera fue mayor en esta muestra (34.25), lo que sugiere una coloración más intensa o saturada. En comparación con la muestra alcalina (pH 12) mostró valores menores en estos parámetros a^* , b^* , C^* (2.35, 29.09 y 29.28 respectivamente), indicando una menor intensidad de color. En cuanto al valor H, ambas muestras presentaron valores cercanos 83.36 y 85.38, indicando que el color predominante en ambas muestras se encuentra dentro de la región amarilla del espectro, demostrando que, a pesar de existir diferencias en la intensidad y

luminosidad, el tipo de color inicial se mantiene igual en ambos tratamientos (Tabla 2).

Tabla 2. Determinación de color en pelambre.

Tratamiento	L	a*	b*	c	H
pH 12	23.41 ± 0.29	2.35 ± 0.25	29.09 ± 0.77	29.18 ± 0.78	85.38 ± 0.43
pH 7	22.06 ± 0.59	3.95 ± 0.16	33.82 ± 1.50	34.25 ± 1.82	83.36 ± 0.38

Wang y colaboradores (2016), mencionan que en condiciones extremas de pH, pueden generarse interacciones intermoleculares que modifican la estructura de la proteína, mientras que en condiciones cercanas a la neutralidad las proteínas tienden a mantenerse más estables y dispersas. Shavandi y colaboradores (2017), reportaron que la presencia de impurezas o residuos químicos durante la extracción de queratina puede provocar cambios en la coloración, generalmente tendiendo hacia tonalidades más oscuras. Los resultados obtenidos en este trabajo comparados con los de otros grupos de investigación, indican que tanto el pH como los procesos de purificación influyen en las propiedades ópticas de las soluciones de queratina. Así mismo, las condiciones de extracción y tratamiento posterior determinan la estabilidad del sistema y su apariencia final.

8.2.3 Viscosidad

La viscosidad de las muestras de queratina obtenidas a pH 7 y pH 12 se determinó mediante un viscosímetro tipo Brookfield. Los resultados mostraron una diferencia en el comportamiento reológico de las muestras observándose que la muestra a pH 7 presentó una viscosidad mayor (18.66) en comparación con la muestra a pH 12 (10.66) tal como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Determinación de viscosidad en el pelambre

Tratamientos	Viscosidad
pH 12	10.66 ± 0.05
pH 7	18.66 ± 0.05

La viscosidad de la muestra pH 7, puede atribuirse al proceso de neutralización y purificación, estos favorecen la estabilidad de las proteínas y promueve interacciones intermoleculares más organizadas. Estas interacciones incrementan el tamaño hidrodinámico de las moléculas en solución, aumentando la resistencia al flujo y, por tanto, la viscosidad tal como lo mencionan Wang y colaboradores (2016). Por otro lado, viscosidad menor observada en la muestra a pH 12 puede atribuirse al proceso de neutralización y purificación, el cual reduce la presencia de agregados y fragmentos insolubles. Este comportamiento concuerda con (Yamauchi, Yamauchi, Kusunoki, Kohda, & Konishi, 1996), obteniendo soluciones de queratina más estables y homogéneas tras procesos de ajuste de pH, lo que favorece una menor interacción intermolecular y, por ende, una disminución en la viscosidad.

Resultados reportados por Shavandi y colaboradores (2017), muestran que durante la extracción de queratina en medios alcalinos pueden formarse sistemas más viscosos debido a la presencia de agregados proteicos y subproductos de la degradación. De igual manera, Wang y colaboradores (2016) describen que la desnaturalización de la queratina puede inducir tanto fragmentación como reagrupamiento de cadenas, generando estructuras complejas que influyen en la viscosidad.

Asimismo, Barone y Liebner (2005) señalan que la viscosidad en sistemas de queratina depende de factores como el peso molecular, la concentración y el grado de interacción entre cadenas proteicas. En este sentido, las condiciones alcalinas extremas pueden generar una mayor complejidad estructural en solución, contribuyendo al incremento de la viscosidad, mientras que condiciones más controladas permiten obtener sistemas más fluidos. Este fenómeno ha sido documentado por (2017) donde soluciones menos purificadas presentan mayor resistencia al flujo debido a la presencia de partículas suspendidas. Los resultados obtenidos en este trabajo confirman que el pH del medio de extracción influye en el comportamiento de las soluciones de queratina. Las condiciones neutras

favorecieron la formación de sistemas más viscosos, mientras que el medio alcalino lleva a una menor viscosidad.

8.2.4 Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La Figura 9 muestra los espectros obtenidos mediante espectroscopía FTIR para las muestras de queratina extraídas bajo diferentes condiciones de pH. En la región de $1500\text{--}1550\text{ cm}^{-1}$ se identifica Amida II en ambos espectros, relacionada con la flexión del enlace N–H y el estiramiento C–N, esto permite confirmar la naturaleza proteica de la queratina. En un rango entre $1220\text{--}1300\text{ cm}^{-1}$, se observa la banda correspondiente a la Amida III, característica de proteínas como la queratina (Coates, 2006). Una de las bandas que más llamó la atención es la ubicada alrededor de 1650 cm^{-1} misma que corresponde a la Amida I, asociada al estiramiento del grupo carbonilo (C=O). En el espectro a pH 12 se observa una pequeña variación en la intensidad y forma del pico, esto puede deberse a una pequeña variación en la estructura secundaria de la queratina. Esta banda proporciona información sobre la estructura secundaria de la proteína, como hélices α o láminas β (Barth, 2007).

Por otra parte, en la región de $2850\text{--}2950\text{ cm}^{-1}$, se identifican bandas asociadas al estiramiento de enlaces C–H alifáticos (CH_2 y CH_3), estos pueden estar relacionados con las cadenas laterales de aminoácidos, así como con la posible presencia de lípidos residuales (Vineis, Varesano, Varchi, & Aluigi, 2019). En ambas muestras se identificaron bandas entre $3200\text{--}3400\text{ cm}^{-1}$, corresponden a la Amida A, la anchura de esta banda puede estar asociada a la presencia de enlaces de hidrógeno, los cuales influyen en la conformación secundaria de la proteína (X. Wang et al., 2021a). Es importante mencionar que en la muestra a pH 12 se aprecia ligeramente más intensa/definida, esto puede deberse a posibles cambios en la estructura.

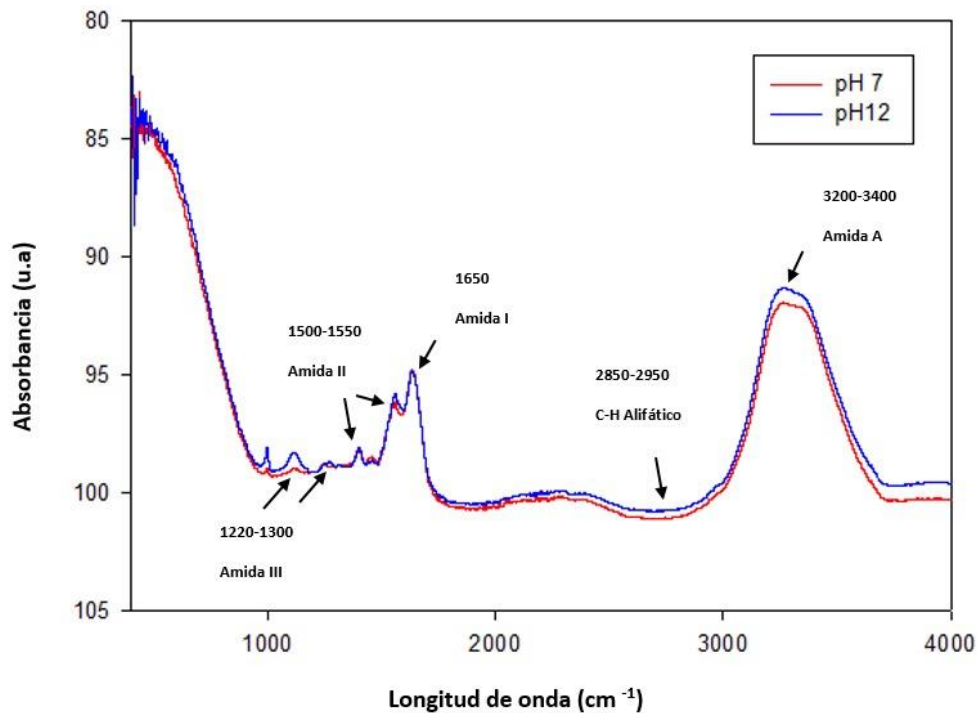


Figura 9. Determinación de grupos funcionales en las muestras.

8.2.5 Determinación de peso molecular SDS-PAGE

En la figura 10, se muestra el análisis electroforético mediante la técnica de SDS-PAGE, este permitió hacer una comparación por duplicado del análisis proteico de las queratinas extraídas a diferente pH (7 y 12). Los resultados muestran que la muestra a un pH 7 presentó bandas con pesos moleculares de 11.6 y 12.1 kDa, mientras que con la muestra a pH de 12 presentó bandas entre 13.6 y 14.6 kDa. Con ello se determina que, en ambos valores de pH, se obtuvieron fracciones de queratina de bajo peso molecular, esta es una característica de proteínas parcialmente hidrolizadas.

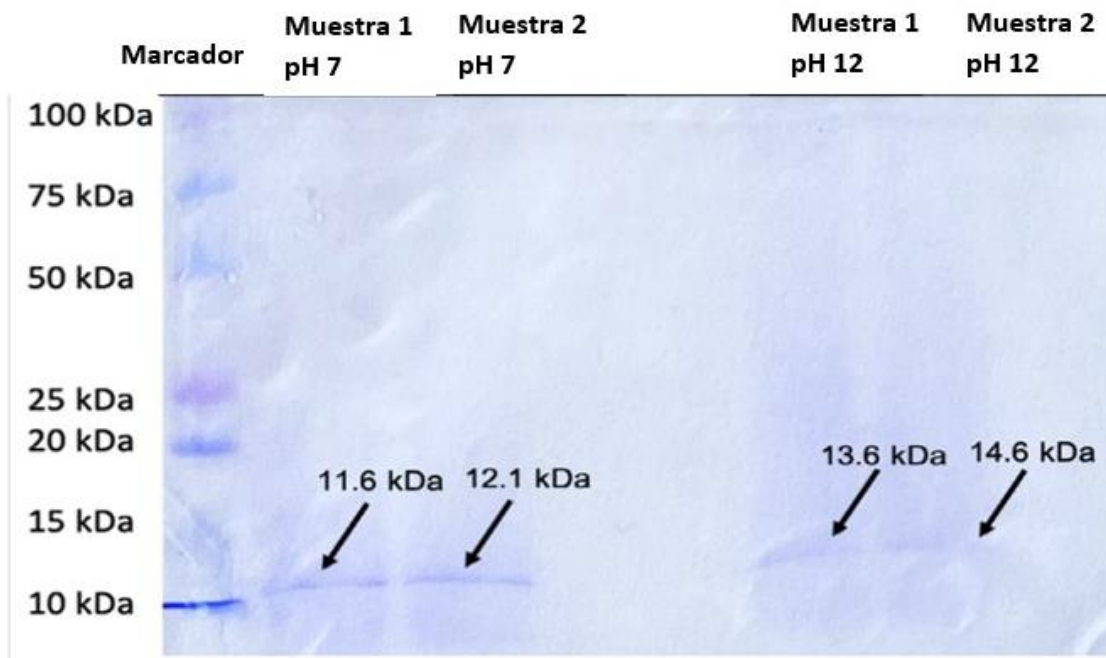


Figura 10. Determinación de peso molecular SDS-PAGE

Xiao y colaboradores (2021b) obtuvieron fracciones de queratina en un rango de 15 a 22 kDa mediante métodos asistidos por ultrasonido utilizando un disolvente mixto de urea-bisulfito sódico, sulfuro de sodio calentando y agitando mecánicamente hasta que el pelo de conejo se disolviera por completo pasándolo por un proceso de filtrado y dializando la muestra con un tubo de diálisis de 8-14 kDa durante 48 horas, cambiando el agua destilada cada 4 horas y ajustando la solución dializada a el punto isoeléctrico de la queratina 4.0. Mattielo (2023b) utilizó lana de borrego para extraer queratina mediante el método de sulfitolisis y reportó una banda de alrededor de 18 kDa. La presencia de estas bandas indica que la sulfitolisis permitió una ruptura controlada de los enlaces disulfuro sin producir una degradación excesiva de la proteína, conservando fracciones características de bajo peso molecular de las queratinas fibrosas.

Wang y colaboradores (2018) mencionaron que al realizar una extracción por medio del disolvente eutéctico profundo (DES) y al aplicar diferentes temperaturas; 80 °C, 98°C y 120° C el grado de descomposición del pelo de conejo se ve modificado y con ello sufre la degradación de las cadenas proteicas y a su vez genera fragmentos de menor peso molecular (3.8–7.8 kDa). Las diferencias entre los valores reportados por otros grupos de trabajo con los obtenidos en esta investigación se atribuyen a los métodos de extracción, el tipo de disolvente y la temperatura, estos influyen en la ruptura de los enlaces disulfuro y en la integridad estructural de la queratina. Asimismo, el pH del medio de extracción influye en el tamaño de las fracciones proteicas obtenidas, sin implicar necesariamente una mayor cantidad de proteína, sino diferencias en su grado de fragmentación. Sin embargo, estas variaciones en el peso molecular no implican necesariamente una mayor cantidad de proteína, sino diferencias en su grado de degradación o conservación estructural.

9 CONCLUSIONES

Dado a los resultados obtenidos en la presente investigación mostraron que, así como el pH del medio de extracción como el método de purificación nos muestra un gran impacto a las propiedades físicas y ópticas de las soluciones de queratina extraída. De igual manera se aprecia que al tener condiciones extremas de pH, al no tener un tratamiento posterior adecuado nos lleva a una formación de soluciones con mayor turbidez y menor luminosidad. A diferencia de los valores cercanos a la neutralidad que junto con los procesos de purificación controlados ayudan a la obtención de soluciones más claras y con mayor estabilidad.

Del mismo modo se estableció que las condiciones de la extracción en particular el pH influye de manera directa en la viscosidad de las soluciones dando a que en condiciones neutras presentan valores de viscosidad más elevados, mientras que en medios alcalinos tiende a disminuir esta propiedad. En el caso de las diferencias observadas con estudios previos, se puede atribuir a diferencias en los métodos de extracción, el tipo de disolvente empleado, temperatura los cuales son factores que influyen en la ruptura de enlaces de disulfuro y en la integridad estructural de la queratina. Finalmente se confirma que la afectación tanto del grado de fragmentación de las fracciones proteicas como el tamaño es afectada por el pH. Así mismo, se recomienda la aplicación de estos péptidos en futuros productos de la industria cosmeceutica y de los biofertilizantes.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Adzet, J. M. ((1995)). *Tecnología del cuero Book* (Ediciones Cícero ed., Vol. (Vol. 4)).
- Adzet, J. M. A. (1995). *Tecnología del Cuero* (Vol. 37). España.
- Banasaz, S., & Ferraro, V. (2024). Keratin from Animal By-Products: Structure, Characterization, Extraction and Application-A Review. *Polymers (Basel)*, 16(14). doi:10.3390/polym16141999
- Banasaz, S., & Ferraro, V. (2024). Keratin from Animal By-Products: Structure, Characterization, Extraction and Application—A Review. *Polymers*, 16(14), 1999.
- Barone, J., & Schmidt, W. (2004). Thermally processed keratin films. *Journal of Applied Polymer Science*, 94(4), 1644–1651.
- Barone, J. R., Schmidt, W. F., & Liebner, C. F. E. (2005). Thermally processed keratin films. *Journal of Applied Polymer Science*, 97(4), 1644-1651. doi:<https://doi.org/10.1002/app.21901>
- Barth, A. (2007). Infrared spectroscopy of proteins. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, 1767(9), 1073-1101. doi:<https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2007.06.004>
- Cárdenas Echerres, E. C., & Ibarra Gutiérrez, L. G. (2022). *Obtención y caracterización fisicoquímica de queratina por medio de hidrólisis alcalina a partir de las plumas gallinaceas (pollos broiler) proveniente de su faenamiento*. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química.
- Chaitanya Reddy, C., Khilji, I. A., Gupta, A., Bhuyar, P., Mahmood, S., Saeed Al-Japairai, K. A., & Chua, G. K. (2021). Valorization of keratin waste biomass and its potential applications. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101707. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101707>
- Chen, H., Gao, S., Li, Y., Xu, H.-J., Li, W., Wang, J., & Zhang, Y. (2022). Valorization of Livestock Keratin Waste: Application in Agricultural Fields. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11), 6681.
- Chilakamarry, C. R., Mahmood, S., Saffe, S., Arifin, M. A. B., Gupta, A., Sikkandar, M. Y., . . . Narasaiah, B. (2021). Extraction and application of keratin from natural resources: a review. *3 Biotech*, 11(5), 220. doi:10.1007/s13205-021-02734-7

-
- Coates, J. (2006). Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach *Encyclopedia of Analytical Chemistry*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Covington, A. D., & Wise, W. R. (2019). *Tanning chemistry: the science of leather*. Cambridge, United Kingdom: Royal society of chemistry.
- Elvira, M. (2009). De qué está hecha la lana y principales características textiles| Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. *Ganadería*, 33(4).
- Fernández-d'Arlas, B., Peña-Rodríguez, C., & Eceiza, A. (2016). Extracción de la queratina de la lana de oveja "Latxa". *Rev. Iberoam. Polímeros*, 17, 110-121.
- Ferraro, V., Anton, M., & Santé-Lhoutellier, V. (2016). The "sisters" α -helices of collagen, elastin and keratin recovered from animal by-products: Functionality, bioactivity and trends of application. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 65-75. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.006>
- Giteru, S. G., Ramsey, D. H., Hou, Y., Cong, L., Mohan, A., & Bekhit, A. E.-D. A. (2023). Wool keratin as a novel alternative protein: A comprehensive review of extraction, purification, nutrition, safety, and food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(1), 643-687. doi:<https://doi.org/10.1111/1541-4337.13087>
- Gousterova, A., Braikova, D., Goshev, I., Christov, P., Tishinov, K., Vasileva-Tonkova, E., . . . Nedkov, P. (2005). Degradation of keratin and collagen containing wastes by newly isolated thermoactinomycetes or by alkaline hydrolysis. *Lett Appl Microbiol*, 40(5), 335-340. doi:10.1111/j.1472-765X.2005.01692.x
- Helman, M. B. (1969). Propiedades histológicas ultramicroscópicas de la lana.
- Kajava, A. V., Squire, J. M., & Parry, D. A. (2006). Beta-structures in fibrous proteins. *Adv Protein Chem*, 73, 1-15. doi:10.1016/s0065-3233(06)73001-7
- Kamarudin, N. B., Sharma, S., Gupta, A., Kee, C. G., Chik, S., & Gupta, R. (2017). Statistical investigation of extraction parameters of keratin from chicken feather using Design-Expert. *3 Biotech*, 7(2), 127. doi:10.1007/s13205-017-0767-9
- Lopez, B., & Benítez, R. (2015). *Extracción de queratina mediante el método de Shindai tradicional y asistido por microondas a partir de residuos de la industria alimenticia (avícola), plumas de pollo (gallusgallus)*.
- Marín, K. d. C. C. (2014). *FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA. UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA*.

-
- Mattiello, S., Guzzini, A., Del Giudice, A., Santulli, C., Antonini, M., Lupidi, G., & Gunnella, R. (2022). Physico-Chemical Characterization of Keratin from Wool and Chicken Feathers Extracted Using Refined Chemical Methods. *Polymers (Basel)*, 15(1). doi:10.3390/polym15010181
- Mattiello, S., Guzzini, A., Del Giudice, A., Santulli, C., Antonini, M., Lupidi, G., & Gunnella, R. (2023a). Physico-Chemical Characterization of Keratin from Wool and Chicken Feathers Extracted Using Refined Chemical Methods. *Polymers*, 15(1). Retrieved from doi:10.3390/polym15010181
- Mattiello, S., Guzzini, A., Del Giudice, A., Santulli, C., Antonini, M., Lupidi, G., & Gunnella, R. (2023b). Physico-Chemical Characterization of Keratin from Wool and Chicken Feathers Extracted Using Refined Chemical Methods. *Polymers*, 15(1), 181.
- Ministerio de Industria, E. y. M. (s.f.). *Guía de producción limpia en curtiembres*. Retrieved from <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/sites/ministerio-industria-energia-mineria/files/documentos/publicaciones/guia-produccion-limpia-curtiembres.pdf>
- Numpaque P., R. V., & Viteri R., S. E. (2016). Biotransformación del pelo residual de curtiembres. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33, 95-105.
- Orjuela Palacio, J. M., & Zaritzky, N. E. (2021). *Evaluación de las condiciones del proceso de extracción de queratina mediante hidrólisis alcalina con hidróxido de sodio*. Paper presented at the VI Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza (ITEE)(La Plata, 14 al 16 de septiembre de 2021).
- Oviedo Zegarra, C. A. (2019). *Análisis del uso de la queratina como biomaterial*. (Tesis de licenciatura), Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- Pääkkönen, I., Rissanen, T., Ora, A., & Anugwom, I. (2025). Valorization of Waste Wool to Keratin with a Green Solvent Based on a Deep Eutectic Mixture of Choline Chloride and Lactic Acid. *Waste and Biomass Valorization*, 16(3), 1045-1055. doi:10.1007/s12649-024-02733-8
- Pasković, I., Popović, L., Pongrac, P., Polić Pasković, M., Kos, T., Jovanov, P., & Franić, M. (2024). Protein Hydrolysates—Production, Effects on Plant Metabolism, and Use in Agriculture. *Horticulturae*, 10(10), 1041.
- Rouse, J. G., & Van Dyke, M. E. *A Review of Keratin-Based Biomaterials for Biomedical Applications: Materials* (Basel). 2010 Feb 3;3(2):999-1014. doi: 10.3390/ma3020999. eCollection 2010 Feb.

-
- Saha, S., Arshad, M., Zubair, M., & Ullah, A. (2019). Keratin as a Biopolymer *Keratin as a Protein Biopolymer* (pp. 163-185). Cham, Switzerland: Springer.
- Shavandi, A., Silva, T., Bekhit, A., & Bekhit, A. (2017). Keratin: dissolution, extraction and biomedical application. *Biomaterials Science*, 5. doi:10.1039/C7BM00411G
- Simpson, W., & Crawshaw, G. (2002). *Wool: Science and technology*. Cambridge, United Kingdom: Woodhead Publishing.
- Vineis, C., Varesano, A., Varchi, G., & Aluigi, A. (2019). Extraction and Characterization of Keratin from Different Biomasses. In S. Sharma & A. Kumar (Eds.), *Keratin as a Protein Biopolymer: Extraction from Waste Biomass and Applications* (pp. 35-76). Cham: Springer International Publishing.
- Wang, B., Yang, W., McKittrick, J., & Meyers, M. A. (2016). Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration. *Progress in Materials Science*, 76, 229-318. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.06.001>
- Wang, D., Yang, X.-H., Tang, R.-C., & Yao, F. (2018). Extraction of Keratin from Rabbit Hair by a Deep Eutectic Solvent and Its Characterization. *Polymers*, 10(9), 993.
- Wang, J., Chen, X., Zhang, J., Sun, X., Liu, C., Fan, Y., . . . Chen, A. (2025). Animal keratin: Multifunctional biomaterial from slaughter by-products-extraction, functionality and applications. *Int J Biol Macromol*, 333(Pt 2), 148921. doi:10.1016/j.ijbiomac.2025.148921
- Wang, X., Shi, Z., Zhao, Q., & Yun, Y. (2021a). Study on the Structure and Properties of Biofunctional Keratin from Rabbit Hair. *Materials*, 14, 379. doi:10.3390/ma14020379
- Wang, X., Shi, Z., Zhao, Q., & Yun, Y. (2021b). Study on the Structure and Properties of Biofunctional Keratin from Rabbit Hair. *Materials*, 14(2), 379.
- Yamauchi, K., Yamauchi, A., Kusunoki, T., Kohda, A., & Konishi, Y. (1996). Preparation of stable aqueous solution of keratins, and physiochemical and biodegradational properties of films. *Journal of Biomedical Materials Research*, 31(4), 439-444. doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4636\(199608\)31:4<439::AID-JBM1>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4636(199608)31:4<439::AID-JBM1>3.0.CO;2-M)