

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE AGRONOMIA Y ZOOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE ZOOTECNIA



TESIS

**CARACTERÍSTICAS TECNOLOGICAS COMPARATIVAS DEL
CUERO DE LLAMA (*Lama glama*) ADULTA CURTIDO CON
MÉTODOS WETWHITE Y WET-BLUE PARA CAPELLADA**

PRESENTADO POR:

Br. RAUL ONASIS PARQUE CCAMA

**PARA OPTAR AL TITULO
PROFESIONAL DE INGENIERO
ZOOTECNISTA**

ASESOR:

Dr. EDGAR A. VALDEZ GUTIERREZ

CUSCO – PERU

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor Mtz Dr. EDGAR VALDEZ GUTIERREZ
 quien aplica el software de detección de similitud al
 trabajo de investigación/tesis titulada: "CARACTERISTICAS TECNOLOGICAS
 COMPARATIVAS DEL CUERO DE LLAMA (Lama glama)
 ADULTA CURTIIDO CON METODOS WET WHITE Y WET-BLUE
 PARA CAPELLADA?"

Presentado por: RAUL ONASIS PARQUE CCAMA DNI N° 80180457;
 presentado por: DNI N°:
 Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO ZOOTECNISTA.

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 14 de ABRIL de 2026



Firma

Post firma Edgar Alberto Valdez Gutierrez

Nro. de DNI 01285940


ORCID del Asesor 0000-0002-2966-7605

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259-578414575



REDACCION_RAUL_080326.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:578414575

105 páginas

Fecha de entrega

14 abr 2026, 9:46 a.m. GMT-5

20.906 palabras

Fecha de descarga

14 abr 2026, 9:57 a.m. GMT-5

118.815 caracteres

Nombre del archivo

REDACCION_RAUL_080326.pdf

Tamaño del archivo

2.4 MB

3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y le revise.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, primero y ante todo a Dios, que en cada momento de duda, dificultad o cansancio, su presencia fue mi refugio y fortaleza. Sin su guía espiritual, este logro no hubiera sido posible.

A mis padres, Jacinta y Julio pilares fundamentales en mi vida, Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la honestidad y la humildad. Sus palabras de aliento, incluso en la distancia o en el silencio, me sostuvieron en los momentos más duros.

A mis hermanos, por creer en mí incluso cuando yo dudaba, y por acompañarme con su cariño y compañía sincera. Su confianza fue una fuente constante de motivación y esperanza.

RAUL ONASIS PARQUE CCAMA

AGRADECIMIENTO

Este trabajo no habría sido posible sin la participación, influencia y acompañamiento de muchas personas a lo largo de mi formación profesional, a quienes deseo expresar mi más sincero agradecimiento.

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente y abrirme las puertas al conocimiento. A la Facultad de Agronomía y Zootecnia, y en especial a la Escuela Profesional de Zootecnia, por su compromiso con la excelencia académica y la formación integral de sus estudiantes.

Mi más profundo agradecimiento al **Mvz. Dr. Edgar Valdez Gutierrez**, por su paciencia, exigencia y dedicación. Sus observaciones, sugerencias y orientación técnica fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación. Más allá de la guía académica, valoro profundamente su ejemplo de compromiso profesional.

A los docentes que me acompañaron durante la carrera, gracias por compartir sus saberes con generosidad y por sembrar en mí la curiosidad, la responsabilidad y el deseo constante de aprender.

A mis compañeros de estudio (Clodomiro y Ferdinan) y colegas de campo, por su colaboración, por los debates constructivos, por las experiencias compartidas y por ser parte esencial de mi crecimiento académico y personal.

INDÍCE GENERAL

INTRODUCCIÓN	01
CAPITULO I	
1.1- Planteamiento del problema.....	03
II. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN	
2.1.OBJETIVOS	
2.1.1. Objetivo General.....	05
2.1.2. Objetivos Específicos.....	05
2.2. Justificación.....	06
III.HIPOTESIS	
3.1.-Hipotesis general.....	08
3.2.-Hipotesis específicos.....	08
IV.- MARCO TEÓRICO	
4.1- Bases Teóricas	
4.1.1- Antecedentes de la investigación.....	09
4.1.1. Importancia del cuero de llama en la cadena productiva altoandina.....	12
4.1.2. Estado actual del aprovechamiento del cuero de camélidos.....	13
4.1.3. Potencial económico y productivo del cuero de llama.....	15
4.1.4.- Características del cuero de llama (<i>Lama glama</i>).....	16
4.2. Métodos de curtido aplicados a cueros de llama.....	20
4.2.1. Generalidades del proceso de curtido.....	20
4.2.2. Curtido wet-blue.....	21.
4.2.3. Curtido wet-white.....	22
4.3. Propiedades físicas del cuero para capellada.....	23
4.3.1. Espesor.....	24
4.3.3. Resistencia a la flexión.....	25
4.3.4. Resistencia al desgarro.....	25
4.3.5. Resistencia a la tracción.....	26
4.3.6. Resistencia a la ruptura de flor.....	27
4.3.7. Temperatura de contracción.....	28
V. – MATERIALES Y METODOS	
5.1.-Lugar del experimento.....	33
5.2.- Equipos y Materiales.....	33
5.3.- Población y muestra.....	35

5.4.- Tratamientos.....	36
5.5.- Proceso de Ribera y Curtido para la Capellada.....	38
5.6.- Proceso de Post Curtido del Cuero para Capellada.....	40
5.7.- Características tecnológicas.....	44
5.8.- Costos operativos asociados al procesamiento del cuero de llama (Lama glama) mediante los métodos de curtido wet-white y wet-blue.....	48
5.9.- Analisis estadístico.....	49
VI.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
6.1.- Espesor del cuero (mm).....	50
6.2. Resistencia a la flexión (ciclos).....	54
6.3. Resistencia al desgarró (N/mm).....	57
6.4. Resistencia a la tracción (N/mm ²).....	60
6.5. Resistencia a la ruptura de flor (mm).....	64
6.6. Temperatura de contracción (°C).....	67
6.7 Evaluación comparativa de los costos operativos de los métodos de curtido wet-white y wet-blue.....	70
VII.- CONCLUSIONES.....	74
VIII.- RECOMENDACIONES.....	75
XI.- BIBLIOGRAFIA.....	76
X.- ANEXOS.....	80

INDICE DE CUADROS

CUADRO 1. Espesor del cuero para capellada de llama (mm).....	50
CUADRO 2. Resistencia a la flexión del cuero para capellada de llama (ciclos).....	54
CUADRO 3. Resistencia al desgarro promedio del cuero para capellada de llama (N/mm).....	58
CUADRO 4. Resistencia a la tracción promedio del cuero para capellada de llama.....	61
CUADRO 5. Resistencia a la ruptura de flor del cuero para capellada de alpaca (mm).....	64
CUADRO 6. Temperatura de contracción del cuero para capellada de llama.....	68
CUADRO 7. Estimación comparativa de los costos operativos por kilogramo de cuero.....	71

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Espesor del cuero para capellada de llama (mm) por tratamiento y repetición.....	79
ANEXO 2. Flexión del cuero para capellada de llama (ciclos) por tratamiento y repetición....	81
ANEXO 3. Desgarro del cuero para capellada de llama (Nmm) por tratamiento y repetición...81	
ANEXO 4. Tracción del cuero para capellada de llama (Nmm ²) por tratamiento y repetición..82	
ANEXO 5. Ruptura de flor para capellada de llama (mm) por tratamiento y repetición	82
ANEXO 6 PANEL FOTOGRAFICO	83
ANEXO 7 Matiz de consistencia.....	90

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Capellada: Parte superior del calzado elaborada con cuero, cuya función es cubrir el pie y aportar resistencia, forma y presentación al producto final.

Cuero de llama: Material obtenido a partir de la piel de llama (*Lama glama*) luego de ser sometida a procesos de ribera, curtido, postcurtido y acabado, con la finalidad de conferirle estabilidad y aptitud para su uso industrial.

Curtido: Proceso mediante el cual la piel es transformada en cuero a través de la acción de agentes curtientes que estabilizan las fibras colágenas, mejorando su resistencia térmica, química y mecánica.

Curtido wet-blue: Método de curtido basado en el empleo de sales básicas de cromo, que produce un cuero con tonalidad azulada y elevada resistencia mecánica y estabilidad térmica.

Curtido wet-white: Método de curtido libre de cromo que emplea agentes curtientes alternativos, como glutaraldehído, sales de aluminio o polímeros sintéticos, obteniendo un cuero de tonalidad clara y con mejor proyección ambiental.

Ribera: Etapa inicial del procesamiento de la piel que comprende operaciones de limpieza y preparación, tales como remojo, pelambre, desencalado y purga, con el propósito de acondicionar la materia prima para el curtido.

Remojo: Operación inicial del proceso de ribera en la que la piel se hidrata para eliminar suciedad, sangre, sal y otras impurezas, facilitando su posterior transformación.

Pelambre: Operación orientada a eliminar el pelo y parte de la epidermis de la piel mediante el uso de agentes químicos adecuados.

Desencalado: Etapa del proceso de ribera destinada a neutralizar y eliminar la cal residual de la piel, preparándola para los tratamientos posteriores.

Purga: Tratamiento enzimático aplicado a la piel con la finalidad de eliminar proteínas no estructurales y mejorar su flexibilidad y uniformidad.

Piquelado: Operación previa al curtido en la que se ajusta el pH de la piel, generalmente mediante ácidos y sales, para favorecer la penetración y fijación del curtiente.

Basificación: Etapa propia del curtido wet-blue en la que se incrementa gradualmente el pH para facilitar la fijación del cromo a las fibras colágenas.

Recurtido: Proceso complementario realizado después del curtido principal con el fin de mejorar propiedades específicas del cuero, como cuerpo, firmeza, tacto o aptitud para el acabado.

Engrase: Operación de postcurtido mediante la cual se incorporan aceites o agentes engrasantes al cuero para otorgarle suavidad, flexibilidad y resistencia al quiebre.

Flor del cuero: Capa superficial visible del cuero, de importancia estética y funcional, cuya integridad influye en la apariencia, durabilidad y aceptación comercial del producto.

Espesor: Propiedad física del cuero expresada en milímetros, relacionada con su grosor y con su comportamiento tecnológico para usos específicos.

Resistencia a la flexión: Capacidad del cuero para soportar deformaciones repetidas sin agrietarse ni romperse, constituyendo un indicador importante de durabilidad.

Resistencia al desgarro: Propiedad mecánica que expresa la capacidad del cuero para oponerse a la propagación de una fisura o rasgado cuando se le aplica una fuerza puntual.

Resistencia a la tracción: Fuerza máxima que puede soportar el cuero antes de romperse cuando es sometido a un esfuerzo progresivo de estiramiento.

Resistencia a la ruptura de flor: Medida de la cohesión y resistencia de la capa superficial del cuero frente a esfuerzos localizados de presión o tracción.

Temperatura de contracción: Indicador de la estabilidad térmica del colágeno curtido, definido como la temperatura a la que las fibras colágenas se contraen irreversiblemente en medio acuoso.

Colágeno: Proteína estructural principal de la dermis, responsable de las propiedades mecánicas de la piel y del cuero.

Dermis: Capa funcional de la piel utilizada en la industria curtidora por su alto contenido de fibras colágenas y por constituir la base estructural del cuero.

Efluentes: Residuos líquidos generados durante el proceso de curtido, cuyo tratamiento resulta necesario para reducir el impacto ambiental del proceso.

Costos operativos: Conjunto de gastos asociados al procesamiento del cuero, incluyendo insumos químicos, agua, energía, mano de obra, mantenimiento y tratamiento de efluentes.

Características tecnológicas: Conjunto de propiedades físicas, mecánicas y térmicas que permiten evaluar la aptitud industrial del cuero para un uso determinado, como la capellada.

RESUMEN

Este estudio evaluó y comparó las características tecnológicas del cuero de llama (Lama glama) destinado a capellada, procesado mediante los métodos de curtido wet-blue y curtido wet-white,. La investigación, realizada en la UNSAAC, analizó las características tecnológicas, propiedades físico-mecánicas y costos operativos bajo un diseño experimental T de student.

Los resultados indicaron que el espesor no tuvo diferencias significativas entre tratamientos (1.52 mm frente a 1.50 mm). Sin embargo, el curtido wet-blue mostró un desempeño superior en resistencia a la flexión (26,324 ciclos), desgarró (30.91 N/mm), tracción (16.73 N/mm²) y temperatura de contracción (90.10 °C). En cuanto a la ruptura de flor, el wet-blue obtuvo valores mayores (11.10 mm), aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa.

Económicamente, el proceso wet-blue resultó más barato, con un costo operativo de S/ 6.80/kg frente a los S/ 7.40/kg del wet-white. No obstante, el curtido wet-white destacó por reducir significativamente los costos en el tratamiento de efluentes, lo que refuerza su sostenibilidad ambiental,.

En conclusión, ambos métodos permiten obtener cuero de llama apto para calzado. Mientras que el wet-blue ofrece un mayor rendimiento tecnológico y mecánico, el wet-white se posiciona como una alternativa con un perfil ecológico superior para la industria.

Palabras clave: Cuero de llama, Curtido wet-blue, Curtido wet-white, Características tecnológicas, Sostenibilidad ambiental.

Abstract

This study evaluated and compared the technological characteristics of llama (*Lama glama*) leather intended for uppers, processed using wet-blue and wet-white tanning methods. The research, conducted at UNSAAC, analyzed the technological characteristics, physical-mechanical properties, and operating costs under a Student's t-test experimental design.

The results indicated that the thickness did not differ significantly between treatments (1.52 mm vs. 1.50 mm). However, wet-blue tanning showed superior performance in flexural strength (26,324 cycles), tear strength (30.91 N/mm), tensile strength (16.73 N/mm²), and shrinkage temperature (90.10 °C). Regarding grain break, wet-blue obtained higher values (11.10 mm), although this difference was not statistically significant.

Economically, the wet-blue process proved cheaper, with an operating cost of S/ 6.80/kg compared to S/ 7.40/kg for wet-white. However, wet-white tanning stood out for significantly reducing effluent treatment costs, thus reinforcing its environmental sustainability.

In conclusion, both methods produce llama leather suitable for footwear. While wet-blue offers greater technological and mechanical efficiency, wet-white is positioned as an alternative with a superior ecological profile for the industry.

Keywords: Llama leather, Wet-blue tanning, Wet-white tanning, Technological characteristics, Environmental sustainability.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de subproductos pecuarios, como las pieles, constituye una estrategia clave para incrementar el valor agregado en las cadenas productivas de origen animal (Salazar & Morán, 2021). En regiones altoandinas del Perú, la piel de llama (*Lama glama*) representa un recurso con gran potencial para la industria del cuero, especialmente por su resistencia natural, características morfológicas particulares y disponibilidad regional (Agustinho & Mangione, 2022). Sin embargo, la calidad del producto final y la sostenibilidad del proceso de curtido dependen, en gran medida, del método de transformación utilizado, lo que plantea desafíos técnicos y ambientales en contextos de producción semi artesanal.

Entre los métodos de curtiembre más difundidos se encuentran el wet-blue y el wet-white, cada uno con ventajas y limitaciones. El método wet-blue, basado en el uso de sales de cromo, ha sido históricamente utilizado por su capacidad para conferir al cuero alta resistencia mecánica, estabilidad térmica y buen desempeño (Rejas *et al.*, 2022). No obstante, su uso intensivo ha generado preocupación por el impacto ambiental del cromo trivalente y hexavalente, así como por las restricciones normativas que enfrentan las curtiembres tradicionales frente a estándares internacionales (Mamani *et al.*, 2023). En contraposición, el método wet-white utiliza agentes curtientes libres de cromo, como glutaraldehído, sulfatos sintéticos y otros compuestos orgánicos, lo cual favorece la reducción de la carga contaminante, aunque puede comprometer ciertas propiedades físico mecánicas del cuero (Sánchez & Luyo, 2023).

Diversos estudios coinciden en que la elección del método de curtido debe considerar no solo los atributos funcionales del producto final, sino también las características histológicas de la piel y su respuesta al proceso químico (Rejas *et al.*, 2022; Agostinho & Mangione, 2022). En el caso de la piel de llama, su estructura dérmica difiere notablemente de otras especies, con una distribución irregular de folículos pilosos y una proporción variable de fibras colágenas, factores que influyen directamente en la penetración del curtiente y en la calidad del cuero obtenido (Zela *et al.*, 2021).

Desde una perspectiva productiva, contar con procesos de curtido eficientes, adaptados a la morfología de la piel de camélidos y con bajo impacto ambiental, resulta crucial para mejorar la competitividad de los pequeños productores e impulsar modelos de desarrollo sostenible en zonas altoandinas (Flores & Puma, 2022). Por ello, se hace necesario generar conocimiento científico comparativo entre los distintos métodos de curtido aplicables a esta materia prima, atendiendo a criterios de calidad, sostenibilidad y viabilidad técnica bajo condiciones regionales.

CAPITULO I

1.1.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En las regiones altoandinas del Perú, particularmente en el Cusco, el aprovechamiento de los subproductos pecuarios constituye una alternativa estratégica para generar valor agregado y fortalecer la economía local. En este contexto, la piel de llama (*Lama glama*) representa una materia prima con potencial para la elaboración de cuero destinado a capellada, marroquinería y otros productos de mayor valor comercial. No obstante, su aprovechamiento industrial continúa siendo limitado, debido a la falta de estandarización en los procesos de curtido y a la escasa información técnica disponible sobre el comportamiento de esta piel frente a diferentes métodos de transformación. Esta situación restringe la valorización de un recurso regional que podría contribuir al desarrollo productivo de las zonas altoandinas.

Entre los métodos de curtido más empleados se encuentran el wet-blue y el wet-white, los cuales difieren en sus implicancias tecnológicas, económicas y ambientales. El curtido wet-blue es ampliamente utilizado por conferir al cuero adecuada resistencia mecánica y elevada estabilidad térmica; sin embargo, su aplicación requiere el uso de sales de cromo, lo que genera preocupación por el impacto ambiental derivado del tratamiento de efluentes. En contraste, el método wet-white surge como una alternativa libre de cromo y con mejor proyección ambiental, aunque su desempeño tecnológico puede variar según las condiciones de procesamiento y el tipo de curtiembre empleado. En consecuencia, persiste incertidumbre respecto a cuál de estos métodos ofrece mejores resultados en el curtido de pieles de llama bajo condiciones de procesamiento semiindustrial.

A pesar de la importancia productiva de esta materia prima, son escasos los estudios comparativos que evalúen específicamente las características tecnológicas del cuero de llama adulta obtenido mediante los métodos wet-blue y wet-white, considerando variables como espesor, resistencia a la flexión, resistencia al desgarro, resistencia a la tracción, resistencia a la ruptura de flor, temperatura de contracción y costos operativos del proceso. Esta carencia de evidencia técnica limita la toma de decisiones para seleccionar el método de curtido más adecuado, tanto desde el punto de vista de la calidad del cuero como de su viabilidad productiva y ambiental. Por ello, resulta necesario desarrollar investigaciones comparativas que permitan establecer criterios técnicos para optimizar el procesamiento del cuero de llama y promover su aprovechamiento eficiente y sostenible en el contexto altoandino.

II. OBJETIVOS

2.1.1.- Objetivo General.

- Evaluar y comparar las características tecnológicas del cuero para capellada de llama (*Lama glama*) adulta, obtenido mediante los métodos de curtido wet-white y wet-blue.

2.1.2.- Objetivos Específicos

- Evaluar comparativamente las propiedades físicas (espesor, resistencia a la flexión, resistencia al desgarro, resistencia a la tracción, resistencia a la ruptura de flor y temperatura de contracción) del cuero destinado a capellada de llama (*Lama glama*) curtido mediante los métodos wet-blue y wet-white.
- Efectuar una estimación comparativa de los costos operativos asociados al procesamiento del cuero de llama (*Lama glama*) mediante los métodos de curtido wet-white y wet-blue, considerando los principales insumos químicos, tiempos de proceso y requerimientos técnicos de cada etapa, con el propósito de identificar diferencias en eficiencia económica y viabilidad productiva.

III. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se justifica por la necesidad de generar conocimiento técnico sobre el aprovechamiento del cuero de llama (*Lama glama*) como materia prima con potencial para la elaboración de productos de mayor valor agregado, especialmente en contextos altoandinos donde la disponibilidad de pieles de camélidos es importante, pero su transformación industrial aún presenta limitaciones. En este escenario, evaluar métodos de curtido como el wet-blue (curtido con cromo) y el wet-white (curtido blanco, mejor uso del cromo) resulta pertinente, debido a que ambos representan alternativas tecnológicas con diferentes implicancias en la calidad del cuero obtenido, en los costos operativos del proceso y en su proyección ambiental. Por ello, comparar estas dos técnicas permite aportar criterios objetivos para seleccionar el método más adecuado en función de las exigencias productivas y tecnológicas del cuero destinado a capellada (Delgado et al., 2018).

Desde el punto de vista técnico y productivo, el estudio adquiere relevancia porque analiza variables directamente relacionadas con la funcionalidad del cuero, tales como el espesor, la resistencia a la flexión, la resistencia al desgarro, la resistencia a la tracción, la resistencia a la ruptura de flor y la temperatura de contracción, además de incluir una estimación comparativa de los costos operativos de cada método de curtido. La evaluación conjunta de estos indicadores permite no solo determinar la aptitud del cuero para su uso industrial, sino también valorar la viabilidad económica del proceso en condiciones de producción semiindustrial. En consecuencia, la investigación proporciona información útil para mejorar la toma de decisiones en sistemas productivos descentralizados, donde la eficiencia técnica y económica constituye un factor

determinante para la sostenibilidad de la actividad (FAO, 2022; Mendiola & Vargas, 2019).

Asimismo, esta investigación se justifica desde una perspectiva científica, debido a la escasez de estudios comparativos enfocados específicamente en el curtido de pieles de llama. A diferencia de otras especies de mayor uso industrial, como el bovino o el porcino, la piel de camélidos presenta características estructurales particulares que requieren ser evaluadas de manera específica para determinar su respuesta frente a distintos agentes curtientes. En ese sentido, el estudio contribuye a ampliar la base de conocimiento sobre la transformación tecnológica de materias primas no tradicionales y favorece la construcción de fundamentos técnicos propios para el aprovechamiento racional de recursos pecuarios regionales, en concordancia con criterios de valorización local y uso eficiente de subproductos (Paredes & Rodríguez, 2021).

Finalmente, la investigación posee importancia académica y aplicada, ya que fortalece las líneas de estudio relacionadas con la transformación pecuaria, la innovación en productos de origen animal y la producción sostenible. Los resultados obtenidos pueden servir como referencia para futuras investigaciones, así como para iniciativas orientadas a mejorar los procesos de curtido en ámbitos locales y regionales. De esta manera, el estudio no solo aporta evidencia empírica sobre el comportamiento tecnológico del cuero de llama bajo dos métodos de curtido, sino que también promueve alternativas de aprovechamiento con criterios de calidad, rentabilidad y responsabilidad ambiental, en concordancia con los enfoques actuales de producción sustentable (Cabieses et al., 2020).

III. HIPOTESIS

3.1. Hipótesis general.

- Existen diferencias significativas en las características tecnológicas del cuero para capellada de llama (*Lama glama*) adulta, obtenidas mediante los métodos de curtido wet-white y wet-blue.

3.2.- Hipótesis específicas.

- Las propiedades físicas del cuero de llama curtido mediante el método wet-blue presentan valores superiores de espesor, resistencia a la flexión, resistencia al desgarró, resistencia a la tracción, resistencia a la ruptura de flor y temperatura de contracción en comparación con el cuero obtenido por el método wet-white.
- El método de curtido wet-white (espesor, resistencia a la flexión, resistencia al desgarró, resistencia a la tracción, resistencia a la ruptura de flor y temperatura) presenta mayores costos operativos totales, debido al mayor requerimiento de insumos químicos y tiempos de proceso, en comparación con el método wet-blue.

IV.- MARCO TEÓRICO

Antecedentes de la investigación.

4.1.1 Antecedentes internacionales

El estudio realizado por Kanagaraj, Velappan, Babu y Sadulla (2010) en el Central Leather Research Institute (India), constituye uno de los referentes más relevantes en la comparación tecnológica entre el curtido al cromo (wet-blue) y los sistemas libres de cromo (wet-white). El trabajo tuvo como objetivo evaluar el desempeño físico-mecánico y el impacto ambiental de ambos métodos mediante la aplicación de normas ISO para tracción, desgarró, flexión y temperatura de contracción. La población estuvo conformada por pieles bovinas y ovinas procesadas bajo condiciones industriales controladas. Los resultados mostraron que el método wet-blue produjo cueros con una resistencia considerablemente superior y con temperaturas de contracción mayores a 100 °C, lo cual evidencia una mayor estabilidad térmica del colágeno. En contraste, el método wet-white redujo significativamente la carga contaminante de los efluentes, aunque presentó una menor estabilidad térmica. Los autores concluyen que los sistemas libres de cromo representan alternativas ambientalmente viables, pero requieren ser optimizados para igualar el rendimiento mecánico del curtido al cromo.

De manera complementaria, el estudio desarrollado por Covington, Lampard y Hancock (2016) en la University of Northampton (Reino Unido), evaluó la eficacia de curtientes sintéticos basados en glutaraldehído y polímeros orgánicos como alternativas libres de cromo para la industria del calzado. Su objetivo central fue analizar el grado de reticulación del colágeno y las propiedades tecnológicas del cuero obtenido mediante estos sistemas, utilizando para ello análisis de microscopía electrónica (SEM) y espectroscopía FTIR, además de pruebas físico-mecánicas estandarizadas. La muestra

consistió en pieles bovinas sometidas a procesos de laboratorio que replicaban protocolos industriales. Los resultados evidenciaron que los cueros curtidos con wet-white presentaron una flor uniforme, mayor flexibilidad y buena respuesta al teñido, aunque con temperaturas de contracción inferiores (85–90 °C) respecto al wet-blue. El estudio concluye que los sistemas alternativos poseen un alto potencial para aplicaciones de marroquinería fina, siempre que se utilicen recurtientes y agentes de engrase adecuados para mejorar su estabilidad térmica y mecánica.

Asimismo, Rojas, Bautista y Céspedes (2020) llevaron a cabo un estudio en la Universidad Mayor de San Andrés (Bolivia), centrado en la especie *Lama glama*, lo que aporta evidencia directa para la presente investigación. El objetivo fue comparar las características físico-mecánicas del cuero de llama y alpaca sometido a curtido wet-blue y wet-white bajo un diseño completamente al azar, utilizando 24 pieles procesadas en planta piloto. Los resultados indicaron que el curtido al cromo generó cueros con mayor resistencia al desgarró, tracción y con temperaturas de contracción de hasta 102 °C. En contraste, el wet-white obtuvo cueros con mejor flexibilidad y suavidad de la flor, aunque con valores inferiores de estabilidad térmica. Los autores concluyen que el método más adecuado depende del uso final del cuero, destacando que la piel de llama mostró un comportamiento técnico superior al de la alpaca debido a su mayor homogeneidad dérmica.

4.1.2 Antecedentes nacionales

En el Perú, el trabajo de Cahuana Cutipa (2014) desarrollado en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, constituye un referente importante en la caracterización tecnológica del cuero de camélidos. La investigación tuvo como objetivo comparar las

propiedades físicas del cuero de alpaca sometido a curtido vegetal (wet-white) y curtido al cromo, utilizando una muestra de diez pieles procesadas mediante protocolos controlados. Los ensayos se realizaron siguiendo estándares internacionales para determinar tracción, desgarró, flexión y características organolépticas de la flor. Los resultados mostraron que el curtido vegetal produjo cueros más flexibles y con mejor afinidad tintórea, mientras que el curtido al cromo presentó valores superiores de resistencia mecánica y mayor estabilidad frente al calor. El autor concluye que ambos métodos son técnicamente viables, pero que la elección debe responder a criterios de sostenibilidad ambiental y al uso final del producto, destacando que la industria artesanal podría beneficiarse ampliamente del uso de sistemas libres de cromo.

Por su parte, Mendiola y Vargas (2018) en un estudio realizado en la Universidad Nacional Agraria La Molina, evaluaron el potencial de los sistemas ecológicos de curtido (wet-white) aplicados a pieles ovinas. El objetivo fue determinar el impacto productivo y ambiental del reemplazo del cromo por agentes sintéticos alternativos. La muestra consistió en pieles ovinas procesadas en laboratorio, sometidas posteriormente a ensayos de resistencia y análisis físico-químico de efluentes. Los resultados evidenciaron que los cueros wet-white redujeron en un 40 % los costos de tratamiento ambiental y mostraron una flor más homogénea, aunque su resistencia mecánica fue ligeramente inferior a la del curtido al cromo. La investigación concluye que el curtido ecológico es una alternativa viable en sistemas artesanales y semi-industriales, particularmente en regiones donde la gestión de residuos representa un desafío técnico y económico.

4.1.3 Antecedentes locales

A nivel regional, en la ciudad del Cusco, Flores y Puma (2021) desarrollaron un estudio en el Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica del Cuero – CITEccal, orientado a evaluar la calidad del cuero de llama procesado bajo métodos artesanales locales. El objetivo del estudio fue determinar las propiedades físico–mecánicas del cuero y analizar la incidencia de la variabilidad del proceso artesanal en la calidad final del producto. La población estuvo constituida por ocho pieles de llama obtenidas de mataderos de la región y sometidas a curtido artesanal. Los ensayos revelaron que existía una variabilidad considerable en el espesor, la resistencia a la tracción y la uniformidad de la flor, lo cual se atribuyó a la ausencia de estandarización en las etapas de ribera y curtido. Los autores concluyen que, aunque la piel de llama posee características naturales favorables para la fabricación de capellada, es indispensable implementar métodos industriales controlados —como el curtido wet-blue y wet-white— para garantizar calidad competitiva.

Finalmente, Valdivia, Soto y Espinoza (2021), en un estudio desarrollado por el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) en las regiones de Cusco y Puno, analizaron la calidad de pieles de camélidos sudamericanos provenientes de mataderos locales. El objetivo fue determinar su aptitud para el curtido industrial mediante la evaluación de parámetros como espesor, presencia de defectos, uniformidad de fibras y condiciones de conservación post–mortem. Se evaluaron treinta pieles de llama y alpaca, encontrándose que la piel de llama presentaba mayor uniformidad estructural y menor contenido de grasa, lo que la hacía más adecuada para productos con alta exigencia mecánica. Sin embargo, se identificaron deficiencias en el desuello y en el manejo inicial de las pieles, lo cual afectaba su rendimiento industrial. El estudio concluye que la mejora del manejo

post-beneficio y la implementación de protocolos de curtido estandarizados son condiciones clave para aprovechar el potencial del cuero de llama en la cadena productiva del sur andino.

Bases Conceptuales.

4.1. Realidad de la producción de cuero en camélidos sudamericanos.

4.1.1. Importancia del cuero de llama en la cadena productiva altoandina

La ganadería de camélidos sudamericanos, especialmente la de la llama (*Lama glama*), representa una actividad tradicional y estratégica para las comunidades altoandinas del Perú, Bolivia y Argentina. Además de su importancia social y cultural, esta especie constituye una fuente múltiple de recursos carne, fibra, cuero y estiércol que pueden ser aprovechados de manera integral dentro de sistemas productivos sostenibles (CONOPA, 2022). El cuero, en particular, es un subproducto de alto potencial económico que, sin embargo, no ha sido plenamente valorizado debido a la falta de tecnologías adaptadas a su estructura dérmica y a la escasa industrialización en las zonas de origen.

Las pieles de llama se caracterizan por su flexibilidad, uniformidad y un grosor intermedio entre el cuero bovino y el ovino, lo que las convierte en materia prima adecuada para productos de cuero liviano, como calzado, prendas de vestir o artesanías finas (Pérez & Ríos, 2019). Estas propiedades, junto con la disponibilidad del recurso, ofrecen oportunidades para el desarrollo de una cadena de valor competitiva que promueva la diversificación económica de la ganadería altoandina. Sin embargo, la limitada infraestructura tecnológica y el desconocimiento de los métodos de curtido más apropiados constituyen barreras significativas para su aprovechamiento industrial.

En los últimos años, diversos proyectos de desarrollo rural y programas de innovación han identificado la industrialización del cuero de llama como un eje clave para fortalecer la rentabilidad del sector camélido. La incorporación de técnicas limpias de curtido, como el wet-white, podría además contribuir a una producción ambientalmente sostenible, en concordancia con las nuevas tendencias del mercado internacional que demandan productos ecológicos y trazables (Flores & Poma, 2021). Por tanto, la valorización del cuero de llama no solo posee relevancia económica, sino también social y ambiental en el contexto de las comunidades de altura.

4.1.2. Estado actual del aprovechamiento del cuero de camélidos

El aprovechamiento industrial del cuero de camélidos en el Perú continúa siendo limitado, a pesar de la abundancia del recurso y del creciente interés por diversificar la producción pecuaria. En la mayoría de los centros de beneficio, las pieles son tratadas como residuos o vendidas sin procesar a intermediarios a precios muy bajos, lo que refleja un desaprovechamiento de su valor potencial (Reyes & Huanca, 2020). Esta situación contrasta con países como Argentina y Bolivia, donde se han implementado pequeñas curtiembres rurales y cooperativas que procesan pieles de llama y alpaca bajo estándares técnicos, generando empleo local y productos exportables.

Entre los factores que explican esta situación destacan la falta de tecnologías de curtido adaptadas a la estructura del cuero de camélidos, la escasez de personal técnico capacitado y la débil articulación entre los actores de la cadena productiva (Mamani et al., 2018). La inexistencia de plantas de curtido especializadas en la sierra sur del Perú limita la posibilidad de transformar localmente las pieles, lo que provoca que la mayor parte del

valor agregado se concentre fuera de las regiones productoras. Además, las curtiembres existentes suelen estar diseñadas para el procesamiento de cueros bovinos, sin considerar las diferencias estructurales y químicas del cuero de llama.

A nivel institucional, se observa un esfuerzo creciente por revalorizar los subproductos de la ganadería de camélidos mediante programas del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y organizaciones como CONOPA y el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA). Sin embargo, los resultados aún son incipientes y no se han consolidado cadenas de valor sostenibles que incluyan al cuero como componente relevante. Por ello, resulta prioritario desarrollar investigaciones aplicadas que evalúen la calidad tecnológica del cuero de llama bajo diferentes métodos de curtido, para sustentar su competitividad frente a materiales tradicionales (Valdivia *et al.*, 2021).

Finalmente, la ausencia de normativas específicas para la estandarización de pieles de camélidos limita su ingreso a mercados especializados. La implementación de protocolos técnicos y sanitarios, junto con la promoción de tecnologías limpias, podría impulsar la producción de cueros de mayor calidad, respondiendo a la creciente demanda por productos sostenibles y de origen natural en mercados nacionales e internacionales (CONOPA, 2022).

4.1.3. Potencial económico y productivo del cuero de llama

El cuero de llama representa una oportunidad de diversificación productiva en los sistemas ganaderos altoandinos. De acuerdo con Valdivia, Soto y Espinoza (2021), el valor comercial de una piel curtida puede multiplicar por diez el precio de venta de la piel cruda, generando ingresos adicionales importantes para los pequeños productores. Esta

valorización depende, sin embargo, de la calidad tecnológica del cuero, la eficiencia del proceso de curtido y la implementación de prácticas de gestión ambiental que garanticen sostenibilidad.

El mercado mundial del cuero se orienta progresivamente hacia productos de bajo impacto ambiental, tendencia que favorece el uso de métodos alternativos al curtido con cromo, como el wet-white. Este cambio tecnológico podría beneficiar la inserción del cuero de llama en mercados ecológicos, en tanto se desarrollen estándares técnicos y certificaciones que avalen su calidad (Ríos *et al.*, 2020). Además, la reducción de los costos ambientales y la posibilidad de acceder a incentivos por producción limpia refuerzan la viabilidad económica del curtido libre de cromo.

En el ámbito nacional, la producción artesanal de cuero de camélidos tiene el potencial de convertirse en un componente estratégico del desarrollo rural sostenible. Integrar a los productores en procesos de capacitación y transferencia tecnológica puede fomentar una cadena de valor inclusiva, generando empleo local y reduciendo las brechas entre zonas urbanas y rurales. La articulación entre universidades, institutos tecnológicos y comunidades altoandinas se presenta como una vía eficaz para promover la innovación en el uso del cuero de llama, orientando su aprovechamiento hacia modelos de economía circular y sostenibilidad (Flores & Poma, 2021).

Finalmente, la consolidación de un sistema de producción técnica y ambientalmente viable de cuero de llama no solo impulsaría la competitividad regional, sino que contribuiría a la conservación de los camélidos sudamericanos, al reconocer el valor integral de todos sus subproductos. Esto permitiría pasar de un aprovechamiento limitado

y extractivo a un modelo de gestión integral del recurso, con base científica, tecnológica y económica.

4.1.4.- Características del cuero de llama (*Lama glama*)

a) Estructura anatómica y composición del cuero de llama

El cuero de llama está compuesto por tres capas principales: la epidermis, la dermis y la hipodermis. De estas, la dermis representa la fracción funcional para la industria curtidora, debido a su alto contenido de fibras colágenas. A diferencia de otras especies como el bovino o el ovino, la dermis de la llama presenta una disposición compacta y un entrelazado de fibras más fino, lo que influye directamente en la flexibilidad, resistencia mecánica y adaptabilidad a productos ligeros (Mamani *et al.*, 2018). Esta composición estructural le confiere propiedades tecnológicas únicas que requieren métodos de curtido específicos para preservar su integridad.

Según estudios histológicos, la densidad y la orientación de las fibras colágenas en la piel de camélidos sudamericanos varían según la edad, la región corporal y las condiciones de manejo del animal. Las pieles de llamas adultas presentan mayor uniformidad en el grosor y mayor resistencia física en comparación con pieles de animales jóvenes, lo cual las hace más adecuadas para productos que requieren alta durabilidad, como la capellada de calzado o accesorios marroquinos (Pérez & Ríos, 2019). Esta especificidad estructural demanda protocolos de curtido que respeten la arquitectura fibrilar, evitando la degradación térmica o química del colágeno.

Otro aspecto importante es la presencia de folículos pilosos relativamente gruesos y abundantes, lo que requiere un proceso eficiente de depilado durante la etapa de ribera. Asimismo, la cantidad de grasa subcutánea suele ser menor que en especies como el

bovino, facilitando la etapa de desencalado y piquelado. Estas diferencias deben ser tomadas en cuenta en el diseño de los protocolos de curtido, ya que inciden en el rendimiento final, en la absorción de agentes curtientes y en la calidad del producto terminado (Flores & Poma, 2021).

Desde una perspectiva fisicoquímica, la piel de llama muestra una buena afinidad a agentes curtientes, siempre que estos sean aplicados bajo condiciones controladas de pH y temperatura. Estudios experimentales reportan que tanto los sistemas de curtido con cromo como los libres de cromo (wet-white) pueden lograr resultados aceptables, aunque existen diferencias significativas en la retención de la flor y la resistencia al desgarro, según el método utilizado (Ríos *et al.*, 2020).

b) Propiedades físicas y mecánicas del cuero.

Las propiedades físicas del cuero determinan su comportamiento tecnológico y su idoneidad para diferentes usos industriales. En el caso del cuero de llama, el espesor promedio varía entre 1.2 y 1.8 mm, dependiendo de la edad del animal y del área de la piel, con mayor grosor en las zonas dorsales (Reyes & Huanca, 2020). Esta característica lo posiciona como un cuero semigrueso, útil para productos de mediana resistencia, como calzado, forros y bolsos.

La resistencia a la tracción y al desgarro son indicadores clave para evaluar la calidad del cuero curtido. Estudios de Mamani *et al.* (2018) muestran que el cuero de llama presenta una resistencia a la tracción superior a los 15 N/mm² y una resistencia al desgarro cercana a los 50 N/mm, cifras comparables a cueros bovinos ligeros si se utilizan procesos adecuados de curtido. Asimismo, su resistencia a la flexión supera las 20,000 dobles sin presentar grietas, lo que evidencia su potencial como material flexible y durable.

Otra propiedad de interés es la temperatura de contracción, la cual indica la estabilidad térmica del colágeno curtido. Los cueros sometidos a curtido wet-blue (con cromo) alcanzan temperaturas de contracción superiores a los 100 °C, mientras que aquellos tratados mediante el sistema wet-white presentan valores cercanos a los 85 °C. Aunque esto podría indicar una menor estabilidad térmica en los cueros wet-white, investigaciones recientes sugieren que con agentes curtientes alternativos como glutaraldehído o resinas poliméricas se pueden lograr temperaturas de contracción competitivas (Valdivia *et al.*, 2021).

Finalmente, la evaluación de la flor (superficie visible del cuero) y la estructura fibrosa posterior al curtido también aporta información sobre la calidad estética y mecánica del producto. El cuero de llama adecuadamente curtido presenta una flor cerrada, con textura suave y uniforme, libre de manchas o arrugas excesivas. Estas características dependen no solo de la materia prima, sino de la correcta selección del método de curtido y de los parámetros operativos durante el proceso (Flores & Poma, 2021).

c) Comparación con otras especies productoras de cuero

Comparado con otras especies domesticadas, el cuero de llama ocupa una posición intermedia entre el bovino y el ovino en cuanto a grosor, resistencia y flexibilidad. A diferencia del cuero vacuno, que suele ser más grueso y rígido, el cuero de llama ofrece una mayor facilidad de manejo para productos de marroquinería fina. En contraste con el cuero ovino, que es más delgado y menos resistente, el de llama proporciona mayor durabilidad y resistencia mecánica (Pérez & Ríos, 2019).

Esta combinación de propiedades lo convierte en una alternativa viable para mercados que buscan cueros de origen natural, resistentes y con menor impacto ambiental. Además, la menor demanda de químicos en las etapas iniciales de ribera y el menor contenido de grasa subcutánea hacen del cuero de llama un insumo más eficiente desde el punto de vista del procesamiento técnico (Ríos *et al.*, 2020). Esto adquiere especial relevancia en el contexto de tecnologías limpias y procesos de curtido ecológicos.

Sin embargo, su menor disponibilidad y las variaciones en calidad entre regiones productoras constituyen desafíos que limitan su estandarización a gran escala. A ello se suma la necesidad de contar con métodos de curtido específicos que respeten su estructura fibrosa y permitan conservar sus propiedades originales. De allí la importancia de comparar experimentalmente los métodos de curtido wet-blue y wet-white bajo parámetros técnicos rigurosos, como se plantea en el presente estudio.

A nivel comercial, el cuero de llama presenta potencial para diferenciarse en nichos de mercado que valoran la trazabilidad, el origen andino y las prácticas de producción ética. La inclusión de este cuero en cadenas de valor sostenibles no solo contribuiría a la diversificación del sector curtiduría, sino también al desarrollo económico de comunidades productoras en zonas altoandinas (CONOPA, 2022).

Bases teóricas

4.2. Métodos de curtido aplicados a cueros de llama

4.2.1. Generalidades del proceso de curtido

El curtido es una operación fundamental en la transformación de pieles en cuero, cuyo objetivo principal es estabilizar las fibras colágenas de la dermis, evitando su putrefacción y dotándolas de resistencia térmica, química y mecánica. Este proceso convierte la piel, un material biológicamente degradable, en un producto durable, flexible y útil para diversas aplicaciones industriales (Sundar *et al.*, 2002). La calidad del cuero final depende en gran medida del método de curtido empleado, los insumos utilizados y el control de parámetros operativos como pH, temperatura y concentración de sales.

El proceso completo se divide en etapas bien definidas: pretratamiento (ribera), curtido, recurtido, engrase, secado y acabado. En la ribera se eliminan los restos orgánicos, grasa y pelo, preparando la piel para una adecuada penetración del agente curtiente. Posteriormente, en la etapa de curtido, se incorporan compuestos que estabilizan las fibras colágenas mediante enlaces cruzados, reduciendo su sensibilidad a la hidrólisis y la degradación microbiana (Kanagaraj *et al.*, 2006).

Existen diferentes métodos de curtido, siendo los más utilizados el curtido al cromo (wet-blue) y los métodos alternativos libres de cromo agrupados bajo la denominación wet-white. La elección entre ambos depende de múltiples factores, como la disponibilidad de insumos, la exigencia técnica del producto final, los requerimientos ambientales y los costos de operación. Para el caso del cuero de llama, cuya estructura fibrosa es más

delicada que la del cuero bovino, es imprescindible una selección cuidadosa del método de curtido para garantizar la conservación de sus propiedades naturales (Ríos *et al.*, 2020).

4.2.2. Curtido wet-blue

El curtido wet-blue es el método más extendido a nivel industrial, basado en la utilización de sales básicas de cromo (Cr^{3+}), generalmente en forma de sulfato básico de cromo. Este agente se une a los grupos carboxilos del colágeno formando enlaces cruzados que confieren gran estabilidad térmica y resistencia mecánica al cuero. El producto final recibe el nombre de wet-blue por su característico color azulado posterior al curtido (Heidemann, 1993).

Entre sus principales ventajas destacan la alta resistencia a la tracción, al desgarro y a la temperatura de contracción, con valores superiores a los 100 °C, lo cual lo hace apto para productos que requieren un alto desempeño técnico. Además, ofrece buena fijación del color en procesos de teñido y un rendimiento elevado en términos de superficie útil del cuero terminado (Kanagaraj *et al.*, 2006). Estas cualidades han consolidado el wet-blue como estándar en curtiembres industriales.

No obstante, el uso de cromo implica riesgos ambientales y sanitarios significativos. Aunque el cromo trivalente (Cr^{3+}) no es tóxico, puede oxidarse a cromo hexavalente (Cr^{6+}), altamente tóxico y cancerígeno, si el proceso no es correctamente gestionado. Por ello, numerosas regulaciones internacionales, como las establecidas por la Unión Europea (REACH), han incentivado la búsqueda de alternativas libres de cromo en la industria del curtido (Sundar *et al.*, 2002).

Para el curtido de pieles de llama, el wet-blue ha mostrado buenos resultados en términos de resistencia física y uniformidad de la flor, siempre que se utilicen parámetros controlados y se adapten las fases de ribera y piquelado a las características de la materia prima. Sin embargo, su sostenibilidad a largo plazo es cuestionada, especialmente en contextos rurales donde el tratamiento de efluentes no siempre está garantizado (Flores & Poma, 2021).

4.2.3. Curtido wet-white

El wet-white es una alternativa al wet-blue que emplea agentes curtientes libres de cromo, como glutaraldehído (Retanal), oxazolidinas, sales de aluminio, polímeros sintéticos o combinaciones de ellos. Su nombre proviene del color blanco que adquiere la piel tras el proceso de curtido, en contraste con el tono azulado del curtido al cromo. Su desarrollo responde a la necesidad de minimizar la carga tóxica y el impacto ambiental de los efluentes generados en curtiembres (Fathima *et al.*, 2005).

Una de sus principales ventajas es la reducción de riesgos asociados al cromo, facilitando el tratamiento de aguas residuales y el cumplimiento de normativas ambientales. Además, el cuero wet-white presenta una excelente aptitud para el teñido en colores claros y una mayor biodegradabilidad en su fase posconsumo. Sin embargo, la resistencia térmica suele ser menor, con temperaturas de contracción entre 80 °C y 90 °C, aunque los avances tecnológicos han permitido mejorar estos parámetros (Heidemann, 1993; Valdivia *et al.*, 2021).

En el caso específico del cuero de llama, estudios experimentales realizados en la región andina muestran que el wet-white puede conservar adecuadamente la estructura de la flor y ofrecer buena resistencia a la flexión, siempre que se utilicen protocolos adecuados de

fijación y reticulación. Asimismo, el menor uso de insumos tóxicos lo convierte en una opción más viable para curtiembres artesanales o semi industriales, donde los sistemas de tratamiento de efluentes son limitados (Pérez & Ríos, 2019).

La implementación de este método en zonas altoandinas podría representar una alternativa sostenible para el procesamiento del cuero de llama, contribuyendo a la mejora de los sistemas productivos locales y a la inserción de productos ecológicos en mercados diferenciados. No obstante, aún se requieren más estudios comparativos que evalúen de forma objetiva el desempeño físico y económico de este método frente al wet-blue, lo cual constituye uno de los ejes centrales de la presente investigación.

4.3. Propiedades físicas del cuero para capellada.

Las propiedades físicas del cuero son indicadores esenciales de su calidad y funcionalidad, especialmente cuando está destinado a aplicaciones específicas como la capellada, es decir, la parte superior del calzado o de artículos de marroquinería. Estas propiedades determinan el comportamiento del cuero frente a esfuerzos mecánicos, su resistencia al uso, su adaptabilidad al diseño industrial y su aceptación en el mercado. La evaluación objetiva de estas características permite establecer criterios técnicos que orienten la elección del método de curtido más eficiente y sostenible.

4.3.1. Espesor

El espesor del cuero es una propiedad básica que influye directamente en su resistencia y flexibilidad. Se mide con micrómetros o calibres digitales y se expresa comúnmente en milímetros. En cueros para capellada, se requiere un equilibrio entre un espesor suficiente para soportar el uso intensivo y una delgadez que permita moldeabilidad y confort. En

pieles de llama, el espesor puede presentar variabilidad según la edad del animal, la zona anatómica y el tratamiento previo a la curtición.

Estudios realizados por Pérez & Ríos (2019) evidenciaron que los cueros de llama curtidos con wet-blue alcanzan espesores más uniformes debido a una mayor compactación de la estructura colágena. Por su parte, el wet-white, si no es correctamente aplicado, puede generar espesores irregulares por menor penetración de agentes reticulantes. Esta variable resulta crítica en procesos industriales donde la consistencia dimensional del material es fundamental para evitar desperdicios y asegurar una producción estandarizada.

Además del método de curtido, factores como el desengrase, el repilado y el tipo de escurrido posterior influyen notablemente en el espesor final. En el contexto del procesamiento artesanal o semi industrial en regiones altoandinas, lograr un espesor controlado es un reto técnico que puede superarse mediante la estandarización de procesos y el uso de moldes de presión ajustados (Valdivia *et al.*, 2021).

4.3.3. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión evalúa la capacidad del cuero para soportar deformaciones repetidas sin agrietarse o romperse, siendo una propiedad clave en aplicaciones que implican movilidad constante, como calzado. Esta prueba se realiza mediante flexómetros que simulan ciclos de flexión estandarizados, una alta resistencia a la flexión indica buena durabilidad y conservación de la integridad estructural del material.

El curtido wet-blue proporciona generalmente mejores resultados en esta propiedad debido a la alta reticulación del colágeno con cromo, lo que mejora la elasticidad y cohesión de las fibras (Kanagaraj *et al.*, 2006). Sin embargo, algunas formulaciones de wet-white modernas han logrado igualar o incluso superar este desempeño al incorporar agentes sintéticos de nueva generación con alta compatibilidad con las fibras dérmicas (Fathima *et al.*, 2005).

Ríos et al. (2020) reportaron que el cuero de llama presenta un comportamiento aceptable a la flexión en ambos métodos, aunque con variaciones según el tiempo de curtido y la calidad de los insumos. El agrietamiento precoz de la flor es un indicador negativo que puede estar relacionado con sobrecurtidos o bajo engrasado, por lo que se recomienda complementar la evaluación de esta propiedad con pruebas de retención de aceites y tacto superficial.

4.3.4. Resistencia al desgarro

La resistencia al desgarro es una medida de la capacidad del cuero para oponerse a la propagación de una fisura o rasgado cuando se aplica una fuerza puntual. Se mide siguiendo la norma, y sus valores dependen de la densidad de fibras colágenas y del grado de entrecruzamiento generado por el curtido. Esta propiedad es crucial para garantizar la seguridad estructural de la capellada, especialmente en diseños sometidos a tensión o ajuste mediante ojales y costuras.

En cueros de llama, la resistencia al desgarro suele ser menor que en cueros bovinos, debido a la menor compactación de la dermis. No obstante, los métodos de curtido pueden influir significativamente en la mejora de esta característica. El wet-blue ofrece ventajas

al incrementar la tenacidad de las fibras, mientras que el wet-white, si está mal formulado, puede generar zonas de debilidad, particularmente en los bordes del cuero (Heidemann, 1993).

Pérez & Ríos (2019) observaron que el desgarro era más frecuente en cueros wet-white cuando no se empleaban agentes de reticulación adecuados. Por ello, la elección de ingredientes como resinas poliméricas o sales de aluminio resulta fundamental para mejorar el desempeño del wet-white en este parámetro. Adicionalmente, la uniformidad del curtido en todo el espesor de la piel es determinante para evitar fallas mecánicas durante el uso del producto final.

4.3.5. Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción indica la fuerza máxima que puede soportar el cuero antes de romperse cuando es sometido a una fuerza de estiramiento progresivo. Se expresa en megapascuales (MPa) o kilogramos por centímetro cuadrado y se evalúa según la norma . Esta propiedad es esencial para garantizar la integridad estructural del cuero durante la fabricación y el uso prolongado del artículo final.

El cuero curtido con cromo destaca por su alta resistencia a la tracción, gracias a la formación de enlaces covalentes entre las cadenas de colágeno. En cambio, el wet-white, si bien ha mejorado en versiones recientes, aún presenta variabilidad en este aspecto, especialmente cuando no se emplean procesos de engrasado y neutralización adecuados (Fathima *et al.*, 2005). La resistencia a la tracción también está influenciada por el nivel de hidratación del cuero, su grosor y el sentido de corte respecto a las fibras.

Estudios realizados por Flores & Poma (2021) con cueros de llama procesados en curtiembres de Cusco revelaron que el curtido al cromo ofrecía valores más altos y estables de resistencia a la tracción, aunque el wet-white mostraba resultados competitivos con formulaciones reforzadas. La optimización de este parámetro implica un control riguroso de la neutralización, el secado y el estirado mecánico del cuero.

4.3.6. Resistencia a la ruptura de flor

La flor del cuero es la capa más superficial y visible, y su integridad es crucial para la estética, durabilidad y aceptación comercial del producto. La resistencia a la ruptura de flor evalúa la cohesión entre las capas dérmicas superficiales ante esfuerzos de tracción o compresión localizada. Esta prueba no está estandarizada por ISO, pero es ampliamente utilizada en laboratorios de control de calidad de la industria del cuero.

El método de curtido afecta directamente esta propiedad. En el caso del wet-blue, la flor tiende a ser más compacta, resistente y con menor riesgo de desprendimiento. En el wet-white, la flor puede presentar fragilidad si no se han reforzado las uniones colágeno-polímero o si el cuero fue sometido a sobrecurtido o engrasado deficiente (Valdivia *et al.*, 2021). La evaluación sensorial, complementada con análisis microscópico, permite identificar microfisuras o zonas de debilidad estructural.

En pieles de llama, cuya flor es más delgada que en especies como el bovino, esta propiedad cobra particular relevancia. Las imperfecciones naturales, como porosidades o cicatrices, pueden afectar la resistencia de la flor, por lo que un curtido uniforme y una selección cuidadosa del área útil son estrategias claves para mejorar el rendimiento del cuero terminado.

4.3.7. Temperatura de contracción

La temperatura de contracción es un indicador termodinámico de la estabilidad del colágeno curtido. Se define como el punto en el que las fibras colágenas se contraen irreversiblemente cuando son calentadas en medio acuoso. Es una medida crítica de la calidad del curtido y se expresa en grados Celsius. Cuanto mayor sea esta temperatura, mayor es la resistencia del cuero al calor y a la degradación (Heidemann, 1993).

El curtido wet-blue alcanza temperaturas de contracción superiores a los 100 °C, lo que lo convierte en la opción preferida para artículos expuestos a condiciones térmicas exigentes. Por su parte, el wet-white, dependiendo de su formulación, puede oscilar entre 70 °C y 90 °C. No obstante, el desarrollo de nuevos agentes curtientes ha permitido mejorar progresivamente este parámetro en formulaciones libres de cromo (Sundar *et al.*, 2002).

En cuero de llama, la temperatura de contracción también puede verse influida por la edad del animal, el grosor de la piel y el nivel de pretratamiento mecánico. Flores & Poma (2021) reportaron que un wet-white bien diseñado puede alcanzar temperaturas de contracción superiores a 85 °C, lo cual resulta adecuado para productos de uso general. La medición precisa de esta propiedad es fundamental para validar técnicamente la estabilidad del curtido y su aptitud industrial.

4.4. Evaluación económica del proceso de curtido

La evaluación económica de los procesos de curtido es fundamental para determinar la viabilidad técnica y financiera de cada método aplicado, considerando tanto el costo

operativo como los insumos requeridos, el tiempo de procesamiento, el rendimiento final y la sostenibilidad ambiental. En el caso del curtido de pieles de llama destinadas a capellada, resulta crucial comparar las implicancias económicas de los métodos wet-blue (a base de sales de cromo) y wet-white (libre de cromo), a fin de establecer criterios para una producción rentable y ecológicamente responsable.

4.4.1. Costos directos de insumos químicos

El costo de los insumos representa una parte significativa del proceso de curtido. El método wet-blue requiere principalmente sales de cromo ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$), ácido fórmico, ácido sulfúrico, agentes básicos de fijación, además de tensioactivos y agentes engrasantes. Estos compuestos suelen tener un costo unitario moderado, pero su manejo requiere equipos de protección y tratamiento de efluentes, lo cual incrementa el costo indirecto.

En contraste, el wet-white utiliza una combinación de sales de aluminio, zirconio, aldehídos modificados y polímeros sintéticos. Aunque estos productos tienden a tener un costo unitario más elevado, su ventaja radica en generar menos residuos peligrosos, lo cual reduce los gastos posteriores en tratamiento ambiental (Sundar *et al.*, 2002). Según un análisis realizado por Valdivia *et al.* (2021), el wet-white puede presentar una reducción del 20 % en costos de disposición de efluentes y residuos sólidos.

Además, algunos productos del wet-white requieren menor tiempo de retención en batanes, lo que permite una rotación más rápida del proceso, optimizando los recursos físicos del taller o curtiembre. Sin embargo, se debe tener en cuenta que ciertos insumos deben importarse, lo que podría afectar el costo total en regiones alejadas como Cusco o Puno.

4.4.2. Costos operativos y consumo de recursos

Los costos operativos incluyen el uso de agua, energía eléctrica, mano de obra y mantenimiento de equipos. En general, el proceso wet-blue tiene un ciclo de curtido más prolongado debido a las fases de basificación, fijación y lavado intensivo. Además, el enjuague del cromo exige mayor volumen de agua para garantizar límites aceptables de residuos en efluentes (Kanagaraj *et al.*, 2006).

El wet-white, por su parte, ha sido desarrollado para ser más eficiente en tiempos de proceso, con menor número de lavados y menor volumen de agua por ciclo, lo que representa un ahorro en recursos hídricos y energéticos (Fathima *et al.*, 2005). En la práctica, esta diferencia puede implicar una reducción de hasta un 15 % del costo operativo por lote, especialmente si se implementan prácticas de recirculación de aguas en la curtiembre.

En cuanto a la mano de obra, ambos procesos requieren personal capacitado para el control del pH, la preparación de soluciones, el tiempo de exposición y la rotación del cuero. No obstante, el wet-blue implica mayores riesgos por toxicidad, lo que puede exigir pagos adicionales por riesgo laboral y equipos de seguridad, incrementando el costo de personal.

4.4.1. Impacto ambiental y costos de mitigación

El impacto ambiental de cada método también incide en los costos de producción. El curtido con cromo genera efluentes que requieren tratamiento específico, dado que el cromo trivalente puede oxidarse a cromo hexavalente (Cr^{6+}), altamente tóxico y regulado por normativas ambientales (Heidemann, 1993). Esto obliga a instalar sistemas de

tratamiento físico químico, filtros y depósitos especiales, elevando los costos de operación.

Por otro lado, el wet-white es considerado una alternativa más ecológica, al no incluir metales pesados en su formulación. Esto permite reducir la carga contaminante del efluente final y facilita la aprobación de licencias ambientales, reduciendo los gastos en infraestructura de tratamiento. Según datos de Ríos *et al.* (2020), una curtiembre de mediana escala que migra al wet-white puede reducir hasta en un 30 % sus gastos asociados a la gestión de residuos.

Sin embargo, debe considerarse que el wet-white requiere una mayor precisión técnica para garantizar la eficiencia del proceso, lo cual puede generar pérdidas económicas si no se realiza un control adecuado de calidad. Por lo tanto, la formación del personal y la automatización parcial del proceso pueden ser necesarias para lograr un resultado económicamente competitivo.

4.4.2. Rendimiento y valor del producto final

El rendimiento por piel procesada, medido en m² útiles o en piezas de cuero clasificadas para capellada, es un factor determinante en la rentabilidad. El wet-blue proporciona cueros con mayor firmeza, elasticidad y estabilidad térmica, lo que suele traducirse en mejor clasificación comercial y mayor valor por unidad procesada. En mercados tradicionales, el cuero wet-blue puede tener una aceptación más amplia debido a su historial de uso y durabilidad comprobada.

El wet-white, aunque históricamente tuvo limitaciones técnicas, ha evolucionado en las últimas décadas hasta convertirse en una opción competitiva en términos de apariencia, tacto y durabilidad. Su ventaja ambiental también es apreciada en mercados especializados que priorizan la sostenibilidad (Pati *et al.*, 2008). Flores & Poma (2021)

reportaron que, en ferias artesanales de Cusco, el cuero wet-white tuvo igual o mayor demanda que el wet-blue entre consumidores interesados en productos eco-amigables.

En términos económicos, un análisis de rentabilidad debe considerar no solo el costo del proceso sino también el valor percibido del producto. Si el cuero wet-white logra posicionarse como un material premium por su perfil ecológico, podría justificar su mayor costo inicial mediante una estrategia de diferenciación y venta con valor agregado.

V. – MATERIALES Y METODOS

5.1 Ámbito de estudio

5.1.1 Ubicación política.

El estudio se desarrolló en dos instituciones especializadas ubicadas en la región Cusco. La fase de curtido se realizó en el Taller de Curtido de Pieles y Cueros del Departamento Académico de Gandería, perteneciente a la Facultad de Agronomía y Zootecnia de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, situado en el Centro Agronómico K'ayra, distrito de San Jerónimo, provincia y región del Cusco.

Las pruebas físico–mecánicas se ejecutaron en los laboratorios acreditados del Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica del Cuero, Calzado e Industrias Conexas – CITEccal, ubicado en el distrito del Rímac, provincia de Lima.

5.1.2 Ubicación geográfica

El Centro Agronómico K'ayra se localiza en las coordenadas aproximadas $13^{\circ}32'45''$ S y $71^{\circ}51'25''$ O, a una altitud de 3230 m s. n. m. La ubicación geográfica fue verificada mediante la plataforma Google Earth, correspondiente al área donde se llevó a cabo el proceso de curtido. La referencia para la fotografía satelital es la siguiente:



Fuentes. Google Earth. (2025). Centro Agronómico K'ayra, Cusco

5.1.3 Condición climática

El Centro Agronómico K'ayra presenta un clima frío templado propio de zonas altoandinas, con temperaturas que oscilan entre 4 °C y 19 °C, humedad relativa promedio de 55–65 %, y precipitaciones anuales concentradas entre los meses de noviembre y marzo. Estas condiciones climáticas influyen en el secado, la conservación y el comportamiento físico de las pieles durante el proceso de curtido, por lo que se mantuvieron registros ambientales diarios para garantizar la uniformidad de las condiciones experimentales.

5.1.4 Duración de la investigación

La investigación se desarrolló entre enero y septiembre de 2025, incluyendo las etapas de obtención de materia prima, procesamiento en ribera y curtido, post-curtido, acondicionamiento del cuero, ejecución de pruebas físico-mecánicas y análisis de datos.

5.2. Equipos y Materiales

Para la ejecución del presente estudio, se emplearán equipos y materiales específicos en función a las etapas del proceso experimental, asegurando la confiabilidad y estandarización de los resultados. La selección de estos recursos se basa en la normativa técnica aplicable y en la experiencia previa de estudios similares.

5.2.1 Materiales de campo

- Doce (12) pieles frescas de llama adulta (*Lama glama*), seleccionadas según criterios de uniformidad en peso y edad.
- Tanques de remojo y recipientes plásticos de almacenamiento.
- Herramientas manuales para depilado, descarnado y repilado.
- Equipos de protección personal (mandiles, guantes reforzados, máscaras, botas de jebe).

5.2.2 Materiales de laboratorio

- Tambor rotatorio de curtido.
- Balanzas electrónicas de precisión (± 0.01 g).
- Micrómetro digital para medición de espesor.
- Máquina universal de ensayos físicos (tensión, desgarro, flexión).
- Termotanque y baño María para la determinación de la temperatura de contracción.
- Reactivos químicos para curtido wet-blue: sulfato básico de cromo, ácido fórmico, ácido sulfúrico, carbonato de sodio, engrasantes sintéticos.
- Reactivos para curtido wet-white: glutaraldehído, resinas sintéticas, sales orgánicas, agentes tamponadores y neutralizantes.
- Equipos de secado, acondicionamiento y estandarización.

5.2.3 Materiales de oficina

- Computadora con software estadístico (R, SPSS o Minitab).
- Hojas de registro, cuadernos de campo y formularios de codificación.
- Impresora y materiales administrativos para sistematización de datos.

5.3 Metodología de la investigación

5.3.1 Tipo y nivel de investigación

La investigación fue de tipo experimental, con un nivel explicativo, ya que se manipularon deliberadamente dos métodos de curtido (wet-blue y wet-white) para evaluar sus efectos sobre las características físico–mecánicas del cuero de llama.

5.3.2 Diseño de investigación

Se empleó un Diseño Estadístico de T de student, con dos tratamientos y seis repeticiones por tratamiento, donde cada unidad experimental estuvo constituida por un cuero completo de llama.

- T1: Curtido wet-blue
- T2: Curtido wet-white

Las variables dependientes evaluadas fueron: espesor, resistencia a la flexión, desgarró, tracción, ruptura de flor y temperatura de contracción.

5.3.3 Población

La población estuvo conformada por pieles de llama adulta provenientes de mataderos locales de la región Cusco, beneficiadas bajo condiciones tradicionales pero seleccionadas bajo estándares de calidad morfológica.

5.3.4 Muestra

La muestra consistió en 12 cueros completos, seleccionados mediante muestreo intencional por criterios de:

- edad estimada (3–5 años),
- ausencia de defectos severos,
- integridad anatómica,
- espesor homogéneo inicial.

Se codificó cada cuero desde su ingreso al laboratorio hasta la finalización de los ensayos físico–mecánicos.

5.3.5 Etapas de la investigación

a) Etapa pre–experimental

Incluyó:

- selección y codificación de pieles,
- verificación de calidad inicial,
- registro de condiciones ambientales,
- calibración de equipos de laboratorio y curtido.

b) Etapa experimental

Comprendió dos fases principales:

1. Proceso de ribera

- remojo (24 h),
- pelambre con sulfuro de sodio y cal,
- desencalado con sales de amonio,
- purga enzimática,
- piquelado según método de curtido.

2. Proceso de curtido

- **Curtido Wet-Blue:** Aplicación de sulfato básico de cromo, basificación controlada y recurtido con resinas sintéticas.
- **Curtido Wet-White:** Aplicación de glutaraldehído, resinas libres de cromo, tamponadores orgánicos y agentes de reticulación.

Ambos métodos se ajustaron a protocolos técnicos utilizados en CITEccal.

5.3. Tratamientos

El diseño experimental contempló dos tratamientos principales, definidos por el tipo de método de curtido aplicado a los cueros de llama (*Lama glama*). Cada tratamiento representa un protocolo técnico industrial distinto, orientado a producir cuero apto para

la elaboración de capelladas, con características diferenciadas tanto en propiedades físico-mecánicas como en costos de procesamiento.

5.3.1. Tratamiento 1: Curtido Wet-Blue

Este tratamiento consistió en aplicar el proceso de curtido wet-blue, basado en el uso de sales de cromo (principalmente sulfato básico de cromo), ampliamente utilizado en la industria del cuero por su capacidad de conferir alta resistencia térmica, buena suavidad y coloración azulada característica. El proceso incluyó las siguientes etapas:

- Remojo y pelambre: eliminación de suciedad, grasa y pelo.
- Desencalado y purga enzimática.
- Piquelado: reducción del pH para preparar el colágeno para el curtido.
- Aplicación del cromo (curtido propiamente dicho).
- Neutralización, recurtido y engrase.

Este método se caracteriza por su eficiencia en el curtido, estabilidad térmica del producto final y rendimiento industrial, aunque con limitaciones asociadas a aspectos ambientales por el uso de cromo.

5.3.2. Tratamiento 2: Curtido Wet-White

El segundo tratamiento aplicó el método de curtido wet-white, una alternativa ecológica que prescinde del uso de compuestos de cromo, empleando en su lugar agentes curtientes sintéticos como glutaraldehído, polifosfatos, sulfonatos orgánicos o sales de aluminio, dependiendo de la formulación técnica. Las etapas principales fueron similares al tratamiento anterior, con variaciones en el curtiente aplicado:

- Remojo, pelambre, desencalado, purga.
- Piquelado.

- Aplicación del curtiente sintético (wet-white).
- Neutralización, recurtido, engrase.

Este método permite obtener cueros de tonalidad clara, adecuados para tinturados posteriores y con menor impacto ambiental, aunque puede presentar diferencias en resistencia térmica y mecánica en comparación con el wet-blue.

5.3.4. Consideraciones Experimentales

Ambos tratamientos fueron ejecutados bajo condiciones controladas y estandarizadas en el Taller de Curtido de Pieles y Cueros de la UNSAAC, empleando insumos certificados, siguiendo protocolos técnicos definidos y documentando cada etapa del proceso. Se utilizaron los mismos tiempos, temperaturas y condiciones de humedad en las fases comunes a ambos métodos para garantizar comparabilidad experimental. La comparación entre tratamientos se centrará en:

- Propiedades físico-mecánicas del cuero terminado.
- Costos de insumos, tiempos de proceso y requisitos técnicos.
- Viabilidad industrial de cada alternativa.

5.4. Proceso de Ribera y Curtido para la Capellada

El proceso de ribera y curtido constituye una etapa fundamental en la transformación de las pieles crudas en cuero apto para su uso como capellada en la industria de la marroquinería y confección. Este procedimiento tiene como objetivo preparar adecuadamente las pieles de llama (*Lama glama*) adulta para recibir los tratamientos químicos específicos según los métodos de curtido wet-white y wet-blue, asegurando la obtención de un cuero con las propiedades físicas y tecnológicas requeridas.

5.4.1 Preparación de la Piel

Las pieles fueron sometidas inicialmente a un proceso de ribera que incluyó las siguientes operaciones:

- **Remojo:** Se realizó con agua limpia a temperatura ambiente (18–20 °C) durante 24 horas, con cambios periódicos del agua, para eliminar impurezas, sangre y restos de sal. Se adicionó un agente humectante no iónico para mejorar la penetración del agua.
- **Pelambre:** Se utilizó una solución de sulfuro de sodio (Na_2S) y cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), en proporciones de 3% y 4% sobre peso de piel, respectivamente. Este proceso duró entre 18 y 24 horas, con agitación intermitente, permitiendo la remoción del pelo y parte de la epidermis.
- **Desencalado y Purga:** Se empleó una solución de ácido láctico al 1% y sales de amonio (NH_4Cl) para neutralizar la cal residual y acondicionar el pH de la piel (pH 7.5 – 8.0). Posteriormente, se aplicó una enzima proteolítica (pancreatina) para la eliminación de proteínas no estructurales, optimizando la flexibilidad del cuero final.

5.4.2. Proceso de Curtido Wet-Blue

El curtido wet-blue se llevó a cabo utilizando sales básicas de cromo ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$). El proceso incluyó:

- **Piquelado:** Se realizó con una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 1% y sal común (NaCl) al 6%, ajustando el pH a 2.8 – 3.0 para facilitar la penetración del cromo.

- **Adición de Cromo:** Se aplicaron sales de cromo al 8% sobre el peso de piel curtida. El tiempo de rotación fue de 8 a 10 horas hasta alcanzar un pH final de 3.8 a 4.0.
- **Basificación:** Se elevó el pH a 4.2 – 4.5 con carbonato de sodio (Na_2CO_3) para fijar el agente curtiente. Se obtuvo cuero con buena resistencia mecánica, adecuado para productos de mayor rigidez como capelladas.

5.4.3. Proceso de Curtido Wet-White

El curtido wet-white, de carácter ecológico, se ejecutó utilizando glutaraldehído (GA) como principal agente curtiente. Este proceso contempló:

- **Precurtido:** Las pieles fueron tratadas con ácido fórmico al 1% y una sal buffer fosfato para reducir el pH a 4.5 – 5.0.
- **Adición del Glutaraldehído:** Se aplicó al 6% sobre el peso de piel. El tiempo de curtido fue de 10 a 12 horas, hasta obtener una distribución homogénea del agente.
- **Fijación:** Se utilizó un neutralizante orgánico (como bicarbonato de sodio) para estabilizar el pH entre 5.5 y 6.0, permitiendo una mejor receptividad del cuero a los posteriores procesos de recurtido y teñido.

Este proceso permitió obtener cueros con mayor blancura, menor impacto ambiental y mayor suavidad, características deseables para productos con mayor exigencia en confort y diseño.

5.5. Proceso de Post Curtido del Cuero para Capellada

El post curtido comprende una serie de etapas posteriores al curtido propiamente dicho, orientadas a optimizar las propiedades físico-mecánicas, organolépticas y de estabilidad del cuero, especialmente cuando su uso está destinado a capellada. A continuación, se

describen los procedimientos diferenciados para cueros tratados mediante curtido al cromo (wet-blue) y mediante curtido sintético (wet-white).

5.5.1. Post Curtido para Cuero Wet-Blue

El proceso de post curtido del cuero wet-blue comprende las siguientes operaciones secuenciales:

- **Retánado:** Se realiza con taninos sintéticos como sulfitos fenoles o resinas sintéticas, con el fin de conferir cuerpo, redondez y mejorar la textura del cuero. El pH se ajusta progresivamente a valores de entre 4.5 y 5.0 para favorecer la penetración de los agentes retanantes.
- **Neutralización:** Se emplean agentes como bicarbonato de sodio o aminas para reducir la acidez residual del cuero curtido al cromo. Este paso es crucial para evitar reacciones adversas en etapas posteriores y mejorar la receptividad del cuero a colorantes y otros productos químicos.
- **Teñido:** Se utiliza colorantes aniónicos o mixtos, que otorgan la coloración deseada a la superficie del cuero. La elección del color depende de las exigencias del producto final (capellada) y se realiza con control de temperatura y pH.
- **Engrase:** Se aplican emulsiones de aceites sintéticos o naturales, que permiten mejorar la flexibilidad, suavidad y resistencia al quiebre. El porcentaje de absorción oscila entre 8 % y 12 % del peso seco del cuero.
- **Lavado y fijación:** Se realiza un enjuague para eliminar el exceso de productos químicos y se aplica un fijador catiónico (formaldehído libre) que estabiliza los colorantes y grasas dentro de la estructura del colágeno.

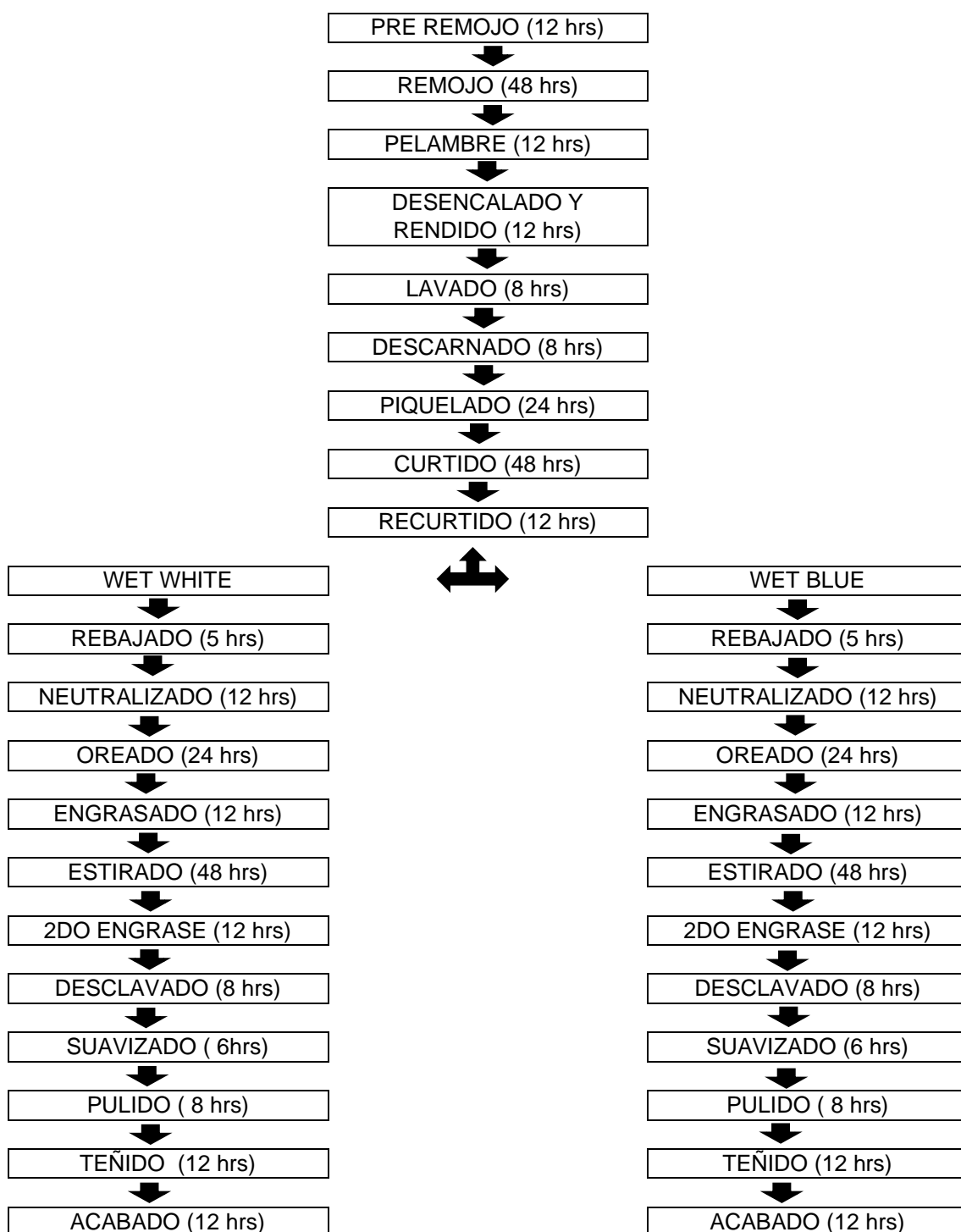
- **Secado intermedio:** Finalizadas las operaciones húmedas, el cuero es escurrido y secado en condiciones controladas, ya sea por vacío, colgado o túneles de secado, hasta alcanzar un contenido de humedad de aproximadamente 18–20 %.

5.5.2. Post Curtido para Cuero Wet-White

El post curtido del cuero wet-white se realiza con especial cuidado, debido a la naturaleza libre de cromo del curtiente inicial. Las etapas son las siguientes:

- **Retánado:** Se efectúa mediante taninos vegetales hidrolizables (quebracho, tara) o sintéticos libres de metales pesados. Esta etapa otorga cuerpo, firmeza y mejora la resistencia mecánica.
- **Neutralización:** Se emplean agentes alcalinos débiles, como carbonato de sodio, ajustando el pH a valores de entre 5.0 y 5.5. La neutralización es clave para preparar el cuero a las siguientes etapas de teñido y engrase.
- **Teñido:** Se utilizan colorantes específicos para cueros sin cromo, que permiten una penetración uniforme sin modificar las características naturales del cuero. El proceso se realiza bajo agitación constante y control de temperatura (30–35 °C).
- **Engrase:** Se emplean grasas libres de sales metálicas y de bajo impacto ambiental, logrando un cuero flexible, suave y con adecuado comportamiento al doblado. El porcentaje de engrase varía entre 10 % y 14 % del peso seco.
- **Fijación:** Se aplica un sistema de fijado basado en polímeros sintéticos o resinas sin formaldehído, asegurando la retención de los agentes aplicados en el retánado, teñido y engrase.
- **Secado controlado:** El cuero es sometido a escurrido mecánico y secado por túnel o colgado, con temperatura inferior a 60 °C, evitando la degradación térmica del colágeno. Se busca un contenido de humedad final del 18 %.

FLUJOGRAMA



Fuente: Modificado de Gómez, 2016.

Figura 1: Etapas y procesos involucrados en el procesamiento de las pieles de llama.

Características tecnológicas

El análisis de las características tecnológicas del cuero de llama (*Lama glama*) tuvo como propósito evaluar de manera cuantitativa su comportamiento frente a diferentes sollicitaciones mecánicas y térmicas, determinando su idoneidad tecnológica para la fabricación de capelladas de calzado.

Las pruebas físico-mecánicas se realizaron conforme a las normas técnicas internacionales ISO y a los protocolos establecidos por el Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica del Cuero, Calzado e Industrias Conexas (CITEccal), asegurando la trazabilidad, confiabilidad y validez de los resultados experimentales.

Cada propiedad fue evaluada mediante métodos estandarizados, expresando los resultados en las unidades de medida correspondientes y comparando los valores promedio obtenidos entre los métodos de curtido wet-blue y wet-white.

5.6.1. Espesor del cuero.

El espesor del cuero representa la distancia entre la superficie superior (flor) y la inferior (carne), expresada en milímetros (mm). Esta propiedad constituye un indicador fundamental de la resistencia, flexibilidad y adaptabilidad del material a procesos industriales de confección. Las mediciones se efectuaron utilizando un micrómetro analógico de precisión (0.01 mm), aplicando una presión constante de 49 kPa sobre cada muestra. Se registraron lecturas en cinco puntos equidistantes de cada probeta, distribuidos en las zonas dorsal, lateral y ventral, promediando los valores obtenidos para determinar el espesor medio.

El análisis comparativo permitió evaluar la uniformidad estructural del cuero curtido por ambos métodos y su compatibilidad con los requerimientos técnicos establecidos para capelladas de calzado, cuya tolerancia recomendada oscila entre 1.2 y 1.8 mm según CITEccal (2022).

5.6.2. Resistencia a la flexión.

La resistencia a la flexión mide la capacidad del cuero para soportar deformaciones repetitivas sin agrietarse ni perder cohesión en la flor. Esta propiedad refleja la durabilidad y elasticidad del material ante condiciones de uso intensivo.

Las pruebas se realizaron en un flexómetro tipo Bally, sometiendo cada muestra a 50 000 ciclos de flexión continua a una frecuencia de 100 ciclos/minuto. Se registraron el número total de ciclos resistidos antes del primer signo de agrietamiento y la apariencia final del cuero. Los resultados se expresaron en número de ciclos resistidos (ciclos), estableciendo comparaciones entre los tratamientos para determinar el método de curtido que ofrece mayor resistencia dinámica y conservación de la flor.

5.6.3. Resistencia al desgarro.

La resistencia al desgarro se definió como la fuerza necesaria para continuar una rasgadura iniciada previamente en el cuero, siendo un parámetro crítico para garantizar la integridad estructural en zonas sometidas a tensión, como costuras y uniones. Las pruebas se realizaron utilizando una máquina universal de ensayos (INSTRON), aplicando una velocidad de tracción de 100 mm/min sobre probetas con incisión central normalizada.

Los resultados se expresaron en Newton por milímetro (N/mm), promediando los valores obtenidos en sentido longitudinal y transversal. Esta propiedad permitió establecer la tenacidad del cuero y su adecuación para productos de uso intensivo.

5.6.4. Resistencia a la tracción y alargamiento.

La resistencia a la tracción indica la fuerza máxima que puede soportar el cuero antes de romperse, mientras que el alargamiento corresponde al porcentaje de deformación experimentado en el momento de la ruptura. Las probetas, cortadas tanto en dirección longitudinal como transversal, fueron ensayadas en la máquina universal de tracción bajo una velocidad de extensión constante de 100 mm/min.

Los valores se expresaron en megapascales (Mpa) para la resistencia y en porcentaje (%) para el alargamiento. Estas variables permitieron caracterizar el comportamiento del cuero ante fuerzas de estiramiento y su capacidad de adaptación durante el montaje industrial de la capellada.

5.6.5. Resistencia a la ruptura de flor

La resistencia a la ruptura de flor constituye una evaluación empírica de la cohesión y resistencia superficial de la capa más externa del cuero, parámetro relevante para conservar la estética y durabilidad del producto final. La prueba consistió en aplicar una presión controlada (N/mm²) sobre un área definida mediante un dispositivo de compresión circular, registrando el punto de agrietamiento o desprendimiento visible de la flor.

Los resultados fueron analizados cualitativa y cuantitativamente, permitiendo identificar diferencias entre tratamientos en cuanto a uniformidad superficial, textura y adherencia dérmica del cuero procesado.

5.6.6. Temperatura de contracción.

La temperatura de contracción (°C) es un indicador de la estabilidad térmica del colágeno curtido, definida como la temperatura en la cual las fibras comienzan a contraerse de manera irreversible. Las pruebas se efectuaron en un baño térmico controlado (termotanque con agitación), incrementando la temperatura a razón de 2 °C/minuto y registrando el punto de contracción visible de la muestra mediante observación microscópica.

Los valores obtenidos se expresaron en grados Celsius (°C), constituyendo un criterio de calidad que refleja la eficiencia del curtido. En general, se esperó que los cueros tratados con el método wet-blue presentaran temperaturas de contracción superiores a 100 °C, mientras que los cueros wet-white alcanzaran valores comprendidos entre 80 °C y 90 °C, según referencias de CITEccal (2022) y Heidemann (1993).

5.7.- Costos operativos asociados al procesamiento del cuero de llama (*Lama glama*) mediante los métodos de curtido wet-white y wet-blue.

El análisis de los costos operativos tuvo como finalidad evaluar la eficiencia económica comparativa de los métodos de curtido wet-blue (a base de sales de cromo) y wet-white (libre de cromo), considerando las condiciones técnicas, los requerimientos de insumos químicos, los tiempos de proceso y los recursos empleados durante la transformación del cuero de llama (*Lama glama*) adulta.

El estudio adoptó un enfoque tecno económico descriptivo y comparativo, tomando como unidad de referencia el costo operativo por kilogramo de piel procesada (S/·kg) bajo condiciones de planta piloto. La evaluación se centró en los costos operativos directos, complementándose con un análisis de eficiencia relativa y viabilidad económica, con el propósito de establecer el método más sostenible desde el punto de vista técnico, ambiental y financiero.

5.7.2 Componentes de costo considerados

El costo operativo total se estimó como la suma de cinco componentes principales:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{reactivos}} + C_{\text{agua}} + C_{\text{energía}} + C_{\text{mano de obra}} + C_{\text{tiempo de proceso}}$$

donde:

- **C reactivos:** Costo de los insumos químicos utilizados en cada método de curtido (curtientes, neutralizantes, reengrasantes, colorantes y agentes auxiliares).
- **C agua:** Costo del consumo de agua y tratamiento de efluentes, calculado según volumen medido (L/kg) y tarifa promedio del laboratorio experimental.
- **C energía:** Costo estimado de energía eléctrica requerida para el funcionamiento de tambores, bombas y sistemas de secado.
- **C mano obra:** Remuneración estimada de personal técnico por hora efectiva de operación.
- **C tiempo proceso:** Valor económico asociado a la duración total del proceso (horas/kg), expresado en términos de productividad relativa.

Cada parámetro fue registrado experimentalmente o calculado a partir de hojas de control operativo utilizadas durante el curtido, divididas por etapas: remojo, pelambre, desencalado, píquel, curtido, neutralización, reengrase, secado y acabado.

5.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La investigación se condujo bajo un Diseño Completamente al Azar (DCA), con dos tratamientos correspondientes a los métodos de curtido wet-blue y wet-white, y seis repeticiones por tratamiento. La unidad experimental estuvo constituida por un cuero completo de llama (*Lama glama*) adulta, procesado individualmente bajo condiciones controladas. Este diseño permitió asegurar la independencia de las observaciones y la comparabilidad de los resultados entre tratamientos.

Para el análisis de los datos se empleó estadística descriptiva e inferencial. En una primera etapa, se calcularon medidas de tendencia central y dispersión para cada variable evaluada. Posteriormente, con el propósito de determinar la existencia de diferencias significativas entre los dos métodos de curtido, se aplicó la prueba t de Student para muestras independientes, considerando un nivel de significancia del 5 % ($p < 0.05$).

El procesamiento de la información se realizó utilizando el software InfoStat, versión 2022, el cual permitió desarrollar los análisis descriptivos e inferenciales requeridos, facilitando una interpretación objetiva y científicamente sustentada de los resultados obtenidos.

VI.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Espesor del cuero (mm).

En el Cuadro 1 se presentan los valores promedio, desviaciones estándar y los grupos de significancia estadística obtenidos para el espesor del cuero de llama adulta curtido mediante los métodos wet-blue y wet-white. El análisis estadístico evidenció ausencia de diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los métodos de curtido wet-blue (1.52 mm) y wet-white (1.50 mm), lo cual sugiere que la naturaleza del agente curtiente no afectó el espesor final del cuero. Los valores obtenidos presentan una variabilidad baja ($CV = 3.9\%$), indicando alta uniformidad y homogeneidad estructural entre las muestras analizadas.

Cuadro 1: Espesor del cuero para capellada de llama (mm).

Tratamiento	Numero de cuero	Espesor (mm)	Media	Prueba de Medias
Wet-Blue	WB-01	1.479	1.52 ± 0.06	A
	WB-02	1.511		
	WB-03	1.628		
	WB-04	1.62		
	WB-05	1.519		
	WB-06	1.48		
Wet-White	WW-01	1.435	1.50 ± 0.05 a	A
	WW-02	1.47		
	WW-03	1.51		
	WW-04	1.485		
	WW-05	1.522		
	WW-05	1.471		

De acuerdo con los estándares internacionales establecidos por la Norma Técnica Peruana, los cueros destinados a capelladas deben poseer espesores comprendidos entre 1.4 y 1.8 mm, rango en el que se encuentran ambos tratamientos, garantizando su aptitud tecnológica y funcional para la fabricación de calzado.

Este comportamiento homogéneo en el espesor puede atribuirse a que el proceso de curtido, tanto con cromo como con glutaraldehído, actúa principalmente sobre las fibras colágenas de la dermis reticular, sin alterar de manera significativa el grosor global del cuero, que está determinado en mayor medida por la especie, edad del animal y el proceso de rebajado mecánico (Álvarez Ascúe, 2018; Covington, 2009).

El análisis estadístico evidenció ausencia de diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los métodos de curtido wet-blue (1.52 mm) y wet-white (1.50 mm), lo cual sugiere que la naturaleza del agente curtiente no afectó el espesor final del cuero. Los valores obtenidos presentan una variabilidad baja ($CV=3.9\%$), indicando alta uniformidad y homogeneidad estructural entre las muestras analizadas.

De acuerdo con los estándares internacionales establecidos por la Norma Técnica Peruana NTP 255.028:2018 y la FAO (2020), los cueros destinados a capelladas deben poseer espesores comprendidos entre 1.4 y 1.8 mm, rango en el que se encuentran ambos tratamientos, garantizando su aptitud tecnológica y funcional para la fabricación de calzado. Este comportamiento homogéneo en el espesor puede atribuirse a que el proceso de curtido, tanto con cromo como con glutaraldehído, actúa principalmente sobre las fibras colágenas de la dermis reticular, sin alterar de manera significativa el grosor global del cuero, que está determinado en mayor medida por la especie, edad del animal y el proceso de rebajado mecánico (Álvarez Ascúe, 2018; Covington, 2009).

El espesor del cuero es un parámetro físico esencial para determinar su comportamiento tecnológico, flexibilidad y resistencia mecánica (Covington, 2009). Los resultados obtenidos demuestran que los cueros de llama curtidos mediante los métodos wet-blue y wet-white presentaron espesores similares, sin diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Este hallazgo coincide con lo reportado por Álvarez Ascúe (2018) en cueros de alpaca huacaya, donde ambos sistemas de curtido conservaron valores próximos a 1.50 mm.

Desde una perspectiva histológica, la estructura dérmica de la piel de llama posee una dermis reticular densa y compacta, con una disposición entrelazada de fibras colágenas gruesas que confiere uniformidad estructural tras el proceso de curtido (Agustinho & Mangione, 2022). Dicha morfología favorece que el espesor no se vea afectado significativamente por la naturaleza del agente curtiente, ya que la penetración del curtiente se distribuye homogéneamente a lo largo de la matriz colágena (Chávez Miranda, 2015).

Por otro lado, los resultados concuerdan con lo reportado por Pacsi Carcahusto (2016), quien al emplear curtientes vegetales en pieles de ovino y alpaca obtuvo espesores promedio entre 1.48 y 1.57 mm, sin variaciones estadísticamente significativas respecto a los curtidos convencionales. Esto refuerza que el grosor del cuero depende más de las etapas de rebajado, secado y prensado, y menos del tipo de curtiente (Covington & Covington, 2020).

En los sistemas wet-blue, el cromo trivalente (Cr^{3+}) genera enlaces coordinados con grupos carboxílicos ($-\text{COOH}$) de las moléculas de colágeno, estabilizando la estructura dérmica sin modificar su volumen macroscópico (Covington, 2009). En los wet-white, el

glutaraldehído actúa sobre grupos aminos (-NH₂), promoviendo enlaces cruzados menos densos pero igualmente efectivos en la fijación del colágeno (Zhou *et al.*, 2022). En ambos casos, el curtido afecta la estabilidad química del colágeno pero no altera el espesor, lo que explica la similitud estadística observada.

Además, la uniformidad del espesor en las muestras estudiadas puede vincularse con el control del rebajado mecánico previo al curtido, etapa crucial para garantizar la homogeneidad de las capas dérmicas. Según Gálvez *et al.* (2021), la variabilidad del espesor es una consecuencia directa del tipo de operación de rebajado, la humedad inicial de la piel y el grado de compactación posterior al secado.

Los valores obtenidos (1.50–1.52 mm) coinciden con los establecidos por la FAO (2020) y por el Instituto Nacional de Calidad – INACAL (2018), lo que confirma la calidad tecnológica del cuero de llama procesado en este estudio. Adicionalmente, el método wet-white representa una alternativa ecológica viable, ya que evita el uso de sales de cromo, reduciendo la carga contaminante de los efluentes sin afectar las propiedades dimensionales del cuero (FAO, 2021).

En conjunto, los resultados permiten concluir que el espesor del cuero de llama no depende del tipo de curtido, sino de la estructura dérmica y del manejo mecánico del material durante el proceso de curtido y acabado. Ambos métodos cumplen satisfactoriamente con los requerimientos normativos de la industria del calzado, confirmando la viabilidad técnica del curtido libre de cromo para aplicaciones comerciales y sostenibles.

5.2. Resistencia a la flexión (ciclos).

En el Cuadro 2 se presentan los valores promedio, desviaciones estándar y las letras de significancia obtenidas para la resistencia a la flexión del cuero de llama adulta sometido a los métodos de curtido wet-blue y wet-white. El análisis estadístico evidenció diferencias altamente significativas ($p < 0.001$) entre los métodos de curtido, siendo los cueros wet-blue notablemente más resistentes a la flexión que los wet-white. Este comportamiento refleja el efecto estructural del tipo de agente curtiente sobre la integridad y elasticidad de la red colágena.

Cuadro 2. Resistencia a la flexión del cuero para capellada de llama (ciclos).

Tratamiento	Numero de cuero	Ciclos	Media	Prueba de Medias
Wet-Blue	WB-01	26364	26324 ± 325	A
	WB-02	26250		
	WB-03	26205		
	WB-04	26746		
	WB-05	26420		
	WB-06	26368		
Wet-White	WW-01	22952	22841 ± 610	B
	WW-02	21875		
	WW-03	22364		
	WW-04	22448		
	WW-05	22281		
	WW-05	23689		

Los valores promedio registrados se ubican dentro de los límites industriales de 20 000 – 30 000 ciclos recomendados por la FAO (2020) y la NTP 255.028:2018 para cueros destinados a capelladas, garantizando así la durabilidad y resistencia al agrietamiento en el doblado repetitivo. La resistencia a la flexión mide la capacidad del cuero para soportar esfuerzos dinámicos de deformación sin presentar fisuras ni pérdida de integridad superficial, siendo un indicador clave de su elasticidad y durabilidad (Covington, 2009).

En este estudio, los cueros curtidos por el método wet-blue mostraron un valor promedio de $26\,324 \pm 325$ ciclos, mientras que los curtidos por el método wet-white alcanzaron $22\,841 \pm 610$ ciclos. Estas diferencias pueden atribuirse a la mayor densidad de enlaces coordinados formados entre los iones trivalentes de cromo (Cr^{3+}) y los grupos carboxílicos ($-\text{COOH}$) del colágeno, que generan una red tridimensional más estable y resistente al esfuerzo cíclico (Covington & Covington, 2020).

Resultados similares fueron reportados por Álvarez Ascúe (2018) en cueros de alpaca huacaya, donde los curtidos wet-blue alcanzaron $27\,056 \pm 1\,015$ ciclos, significativamente superiores a los $23\,412 \pm 890$ ciclos del wet-white. Asimismo, Pacsi Carcahusto (2016) observó valores más bajos ($18\,500 - 21\,000$ ciclos) en curtidos vegetales con extracto de *Baccharis dracunculifolia*, lo que evidencia que los enlaces polifenólicos confieren menor flexibilidad frente al cromo o al glutaraldehído.

Desde la perspectiva estructural, los hallazgos de Agostinho y Mangione (2022) en piel de llama describen una dermis reticular gruesa con predominio de fibras colágenas

densamente empaquetadas, característica que confiere rigidez y resistencia mecánica, pero que puede limitar la flexibilidad cuando la reticulación es incompleta.

Esto explica la menor resistencia del cuero wet-white, cuya estructura, aunque estable, contiene zonas menos reticuladas y por ende más susceptibles a la fatiga dinámica.

En el plano molecular, la acción del glutaraldehído genera enlaces covalentes tipo imina ($-\text{CH}=\text{N}-$) entre grupos aminos de la lisina y aldehídos libres; sin embargo, su distribución irregular produce una red menos homogénea, reduciendo la elasticidad global del material (Zhou *et al.*, 2022). En contraste, el wet-blue forma complejos metálicos estables que refuerzan la triple hélice del colágeno, confiriendo mayor tenacidad y memoria elástica al cuero (Covington, 2009).

Otros autores como Gálvez *et al.* (2021) han demostrado que la resistencia a la flexión está directamente relacionada con la densidad de enlaces cruzados y el contenido de agua residual, siendo ambos factores determinantes de la movilidad molecular y del comportamiento viscoelástico del material.

A nivel tecnológico, la FAO (2020) y el INACAL (2018) establecen que un cuero para capellada debe resistir al menos 20 000 ciclos sin presentar agrietamiento visible. Los resultados de este estudio superan este valor en ambos métodos, ratificando que tanto el wet-blue como el wet-white son tecnológicamente aptos para calzado. Sin embargo, es relevante destacar que el método wet-white, a pesar de su menor desempeño mecánico, posee ventajas ambientales significativas, reduciendo la carga contaminante de los efluentes hasta en 70 % y eliminando completamente el riesgo de oxidación de Cr^{3+} a Cr^{6+} (FAO, 2021).

Por tanto, su implementación representa una alternativa sostenible viable en la industria del curtido, siempre que se optimicen las fases de reengrase y secado para mejorar la elasticidad final del producto (Martínez et al., 2023; Journal of Cleaner Production).

En conclusión, la diferencia de resistencia a la flexión entre ambos métodos refleja una compensación entre rendimiento mecánico y sostenibilidad ambiental, confirmando que el cuero wet-blue mantiene una superioridad técnica, mientras que el wet-white constituye una opción ecológica funcional con aceptable desempeño físico.

5.3.- Resistencia al desgarro (N/mm)

En el Cuadro 3 se muestran los resultados promedios, desviaciones estándar y significancia estadística del ensayo de resistencia al desgarro (N/mm) del cuero de llama adulta, sometido a los métodos de curtido wet-blue y wet-white. Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.01$) entre ambos tratamientos. Los cueros curtidos con cromo (wet-blue) presentaron una resistencia promedio un 10.3 % superior a la obtenida por los cueros curtidos con glutaraldehído (wet-white).

La resistencia al desgarro expresa la capacidad del cuero de resistir fuerzas que tienden a separar sus fibras colágenas, constituyendo un parámetro mecánico directamente asociado con la compactación de la dermis y la calidad del entrecruzamiento colágeno–curtiente (Covington, 2009).

Cuadro 3. Resistencia al desgarramiento promedio del cuero para capellada de llama (N/mm).

Tratamiento	Numero de cuero	Resistencia al desgarramiento (N/mm)	Media	Prueba de Medias
Wet-Blue	WB-01	33.15	30.91 ± 1.79	A
	WB-02	29.14		
	WB-03	29.89		
	WB-04	33.23		
	WB-05	30.94		
	WB-06	31.39		
Wet-White	WW-01	26.19	27.71 ± 1.17	B
	WW-02	28.13		
	WW-03	26.61		
	WW-04	28.32		
	WW-05	28.84		
	WW-05	28.92		

En este estudio, los cueros curtidos con sulfato básico de cromo (wet-blue) mostraron una resistencia significativamente mayor (30.9 ± 1.8 N/mm) que aquellos tratados con glutaraldehído (wet-white, 27.7 ± 1.2 N/mm). Este comportamiento concuerda con los hallazgos de Álvarez Ascúe (2018), quien en cueros de alpaca huacaya reportó valores de 31.4 ± 1.5 N/mm (wet-blue) y 28.6 ± 1.2 N/mm (wet-white), confirmando la superioridad mecánica del curtido con cromo en términos de cohesión y tenacidad del material.

De manera similar, Chávez Miranda (2015) registró resistencias al desgarro de 16.4 N/mm en cueros curtidos con tara vegetal y 18.7 N/mm en sistemas con sales de cromo, atribuyendo la diferencia al tipo y densidad de enlaces formados dentro de la matriz colágena.

A nivel microscópico, los estudios de Agostinho y Mangione (2022) describen la piel de llama como un tejido con dermis reticular espesa y fibras colágenas entrelazadas, capaces de soportar tensiones elevadas cuando se logra una reticulación uniforme.

En el caso del curtido con glutaraldehído, los enlaces formados son covalentes y actúan principalmente sobre grupos aminos (-NH₂) de la lisina, generando una red menos densa y, por ende, ligeramente menos resistente a la fractura transversal (Zhou et al., 2022).

El proceso wet-blue, en cambio, promueve una reticulación tridimensional más homogénea, ya que los iones Cr³⁺ interactúan con múltiples grupos carboxílicos (-COOH) del colágeno, fortaleciendo la red interna y reduciendo la propagación de microfisuras durante el esfuerzo de corte (Covington & Covington, 2020).

Estos enlaces coordinados incrementan la estabilidad térmica y mecánica del material, otorgando mayor resistencia al desgarro sin comprometer la flexibilidad.

Gálvez *et al.* (2021) sostienen que la resistencia al desgarro depende no solo del tipo de curtiente, sino también de la orientación de las fibras en la dermis reticular y del contenido de grasa residual tras el reengrase. Un engrase insuficiente puede generar microzonas rígidas que actúan como puntos de fractura, fenómeno más evidente en cueros wet-white.

A pesar de la diferencia observada, ambos tratamientos presentaron valores que superan los mínimos normativos establecidos por la NTP 255.028:2018 (≥ 25 N/mm), lo que demuestra que tanto el curtido con cromo como con glutaraldehído producen cueros apropiados para aplicaciones estructurales en la fabricación de calzado (FAO, 2020).

Desde una perspectiva ambiental, la literatura reciente (FAO, 2021; European Leather Confederation, 2022) destaca que los sistemas wet-white pueden reducir la carga contaminante de efluentes en un 60–70 %, al eliminar el uso de cromo y minimizar los riesgos de oxidación a Cr^{6+} . Aunque presentan una leve disminución en la resistencia al desgarro, esta diferencia no compromete la funcionalidad del cuero para capelladas ecológicas.

Finalmente, estudios recientes de Martínez et al. (2023) demuestran que el uso de agentes reengrasantes y tensioactivos biodegradables mejora significativamente la resistencia al desgarro en curtidos wet-white, acercándolos al rendimiento del wet-blue. Esto sugiere que, mediante la optimización química del proceso, el método wet-white podría alcanzar niveles equivalentes de desempeño mecánico sin impacto ambiental negativo.

5.4.- Resistencia a la tracción (N/mm²).

En el Cuadro 4 se muestran los resultados promedio, desviaciones estándar y las letras de significancia correspondientes a la resistencia a la tracción (N/mm²) del cuero de llama adulta curtido mediante los métodos wet-blue y wet-white. El análisis estadístico evidencia diferencias altamente significativas ($p < 0.001$) entre los tratamientos, donde los cueros curtidos con sulfato básico de cromo (wet-blue) alcanzaron una resistencia promedio un 20 % superior respecto a los curtidos con glutaraldehído (wet-white).

Ambos métodos superaron el valor mínimo de 10 N/mm² exigido por la NTP 255.028:2018 y las especificaciones de la FAO (2020), garantizando su uso en capelladas de calzado.

Cuadro 4. Resistencia a la tracción promedio del cuero para capellada de llama.

Tratamiento	Numero de cuero	Resistencia a la tracción (N/mm²)	Media	Prueba de Medias
Wet-Blue	WB-01	17.28	16.73 ± 0.72	A
	WB-02	15.92		
	WB-03	17.05		
	WB-04	16.5		
	WB-05	14.89		
	WB-06	17.08		
Wet-White	WW-01	12.11	13.25 ± 0.84	B
	WW-02	13.67		
	WW-03	12.42		
	WW-04	14.33		
	WW-05	12.68		
	WW-05	12.67		

La resistencia a la tracción refleja la capacidad del cuero de resistir esfuerzos longitudinales hasta el punto de ruptura, siendo un indicador crítico de la integridad estructural y cohesión de las fibras colágenas (Covington, 2009).

En este estudio, el cuero curtido con cromo (wet-blue) mostró una resistencia promedio de 16.73 ± 0.72 N/mm², significativamente mayor que la obtenida con glutaraldehído (wet-white, 13.25 ± 0.84 N/mm²). Estos resultados coinciden con los de Álvarez Ascúe (2018), quien observó en cueros de alpaca valores de 15.8 ± 0.9 N/mm² para el wet-blue y 13.2 ± 1.1 N/mm² para el wet-white, atribuyendo esta diferencia a la mayor densidad de enlaces de coordinación entre el cromo trivalente (Cr³⁺) y los grupos carboxílicos (-COOH) del colágeno, los cuales generan una red tridimensional más estable y resistente a la deformación.

La teoría química del curtido (Covington & Covington, 2020) explica que los complejos Cr³⁺-colágeno se forman en sitios específicos de la molécula de tropocolágeno, fortaleciendo la estructura helicoidal y limitando el deslizamiento de las fibras. Por el contrario, en el sistema wet-white, los enlaces imínicos (-CH=N-) generados por el glutaraldehído son menos uniformes y más susceptibles a la hidrólisis, lo que reduce la resistencia tensil y la elasticidad.

A nivel histológico, Agostinho y Mangione (2022) describen la piel de llama como una dermis reticular de alta densidad fibrilar con predominio de colágeno tipo I, característica que le otorga gran capacidad de tensión longitudinal. Sin embargo, la respuesta mecánica final depende de la eficiencia del curtiente para penetrar y estabilizar esta matriz colágena.

Chávez Miranda (2015) y Pacsi Carcahusto (2016) también observaron diferencias significativas entre curtientes metálicos, aldehídicos y vegetales, señalando que los primeros generan una red de enlaces cruzados más densa y resistente.

El presente trabajo confirma que el curtido con cromo mejora la cohesión intermolecular, incrementando la tenacidad y resistencia frente a tensiones prolongadas.

Por su parte, Gálvez et al. (2021) demostraron que el contenido de humedad residual y el tipo de reengrase influyen significativamente en la resistencia a la tracción. Un reengrase uniforme, como el aplicado en este estudio, optimiza la distribución de lípidos entre fibras, favoreciendo la flexibilidad sin comprometer la fuerza tensil.

Desde el punto de vista normativo, la FAO (2020) establece como referencia internacional un mínimo de 10–12 N/mm² para cueros destinados a calzado, valores ampliamente superados por ambos métodos. El wet-blue ofrece un desempeño técnico superior, mientras que el wet-white pese a su menor resistencia cumple los estándares de calidad industrial y presenta la ventaja de ser libre de metales pesados, reduciendo significativamente la contaminación de los efluentes.

En la literatura reciente, Martínez et al. (2023) y Zhou et al. (2022) destacan que la mejora del método wet-white mediante el uso de agentes reticulantes híbridos (aldehído-orgánicos) y reengrasantes biodegradables permite alcanzar valores comparables al wet-blue, demostrando el potencial de innovación en curtidos ecológicos.

Finalmente, se puede inferir que la resistencia a la tracción en cueros de llama está determinada por la combinación entre la morfología dérmica, la densidad de reticulación y la estabilidad química del curtiente. El cromo sigue siendo el estándar técnico por su alto rendimiento mecánico; sin embargo, el wet-white representa una alternativa sostenible con propiedades adecuadas para aplicaciones comerciales de bajo impacto ambiental.

5.5.- Resistencia a la ruptura de flor (mm).

En el Cuadro 5 se presentan los valores promedio, desviaciones estándar y significancia estadística correspondientes a la resistencia a la ruptura de flor (mm) del cuero de llama adulta curtido mediante los métodos wet-blue y wet-white. El análisis estadístico reveló diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos, evidenciando que los cueros curtidos con cromo (wet-blue) presentaron una resistencia a la ruptura de flor un 7.8 % superior respecto a los curtidos con glutaraldehído (wet-white). Ambos valores se encuentran dentro del rango de 10–12 mm recomendado por la FAO (2020) y la NTP 255.028:2018 para cueros destinados a capelladas, asegurando un comportamiento adecuado frente a tensiones concentradas en la superficie de la flor.

Cuadro 5. Resistencia a la ruptura de flor del cuero para capellada de alpaca (mm).

Tratamiento	Numero de cuero	Ruptura de flor (mm)	Media	Prueba de Medias
Wet-Blue	WB-01	11.16	11.10 ± 0.80	A
	WB-02	10.45		
	WB-03	12.32		
	WB-04	10.68		
	WB-05	10.75		
	WB-06	11.57		
Wet-White	WW-01	11.77	10.30 ± 0.70	B
	WW-02	10.38		
	WW-03	10.33		
	WW-04	11.82		
	WW-05	10.04		
	WW-05	11.02		

La resistencia a la ruptura de flor mide la capacidad del cuero para soportar la tensión localizada que actúa sobre la capa superficial (epidermis y dermis papilar) antes de producirse el agrietamiento o separación del grano. Este parámetro está directamente relacionado con la calidad del curtido, la adherencia entre capas dérmicas y la uniformidad del engrase (Covington, 2009).

En el presente estudio, el cuero curtido por el método wet-blue alcanzó valores promedios de 11.1 ± 0.8 N/mm², superiores a los 10.3 ± 0.7 mm obtenidos en el wet-white. La diferencia estadística observada confirma la influencia del tipo de curtiente sobre la resistencia superficial y cohesión de la flor, lo cual concuerda con los resultados reportados por Álvarez Ascúe (2018), quien en cueros de alpaca obtuvo valores de 11.5 ± 0.9 mm (wet-blue) y 10.4 ± 0.8 mm (wet-white).

Este comportamiento se explica por la acción estabilizadora del cromo trivalente (Cr³⁺) sobre las fibras colágenas de la dermis papilar, que refuerza la unión entre las capas reticular y superficial, reduciendo la posibilidad de delaminación bajo carga puntual (Covington & Covington, 2020). En contraste, el glutaraldehído, aunque forma enlaces covalentes con los grupos aminos (-NH₂) del colágeno, produce una red menos compacta en la superficie del cuero, lo que ocasiona una ligera pérdida de cohesión en la flor (Zhou *et al.*, 2022).

A nivel histológico, Agostinho y Mangione (2022) describieron que la piel de llama posee una epidermis delgada y una dermis papilar bien diferenciada, características que favorecen la flexibilidad pero la hacen más susceptible a la ruptura superficial si la reticulación no es suficientemente densa. La estructura compacta y el entrelazamiento de

las fibras colágenas, combinados con una correcta penetración del curtiente, son esenciales para garantizar una flor resistente al agrietamiento (Gálvez *et al.*, 2021).

Asimismo, Chávez Miranda (2015) reportó valores de ruptura de flor entre 9.5 y 11.2 N/mm² en cueros curtidos con tara vegetal, indicando que la densidad de enlaces de curtientes polifenólicos puede limitar la resistencia superficial frente a los curtidos minerales. En este sentido, los resultados del presente trabajo demuestran que el sistema wet-blue ofrece una mayor integridad superficial, aunque el wet-white alcanza valores funcionalmente aceptables para el uso en calzado, cumpliendo con las normas internacionales de calidad (INACAL, 2018; FAO, 2020).

Por otra parte, los procesos de reengrase y secado también influyen en la resistencia de la flor. Según Gálvez *et al.* (2021), una distribución irregular de lípidos puede generar microzonas secas que favorecen el agrietamiento prematuro. El control térmico del secado y la aplicación uniforme de aceites lubricantes como los utilizados en este trabajo— contribuyen a mantener la elasticidad y continuidad superficial del cuero, evitando microfracturas en la flor durante la tensión mecánica.

Desde un enfoque ambiental, aunque el método wet-blue ofrece una ventaja técnica en la resistencia superficial, el wet-white representa una alternativa libre de metales pesados, que reduce la contaminación de los efluentes y permite el cumplimiento de las políticas de sostenibilidad industrial promovidas por la FAO (2021) y la Confederación Europea del Cuero (2022).

Finalmente, el equilibrio observado entre resistencia, flexibilidad y desempeño ambiental sugiere que ambos métodos son viables para la producción de capelladas, dependiendo de los objetivos de sostenibilidad de cada línea productiva.

5.6. Temperatura de contracción (°C)

En el Cuadro 6 se presentan los valores promedio, desviaciones estándar y la significancia estadística para la temperatura de contracción (°C) del cuero de llama adulta, según el método de curtido aplicado. El análisis estadístico evidenció diferencias altamente significativas ($p < 0.001$) entre tratamientos, siendo los cueros curtidos con cromo (wet-blue) los que alcanzaron una temperatura de contracción promedio 5.7 °C superior a los curtidos con glutaraldehído (wet-white). Ambos tratamientos se encuentran dentro del rango técnico aceptable (≥ 80 °C) establecido por la FAO (2020) y la NTP 255.028:2018, garantizando la estabilidad térmica y resistencia hidrolítica del colágeno curtido.

La temperatura de contracción constituye una propiedad crítica del cuero, que mide la estabilidad térmica de la estructura colágena frente al calentamiento progresivo en medio acuoso. Representa el punto en el que los enlaces entre fibras colágenas comienzan a romperse, generando la desnaturalización parcial de la triple hélice (Covington, 2009).

En este estudio, los cueros wet-blue mostraron temperaturas de contracción significativamente superiores (92.1 ± 1.3 °C) respecto a los wet-white (86.4 ± 1.4 °C).

Este incremento térmico se explica por la formación de complejos coordinados entre el cromo trivalente (Cr^{3+}) y los grupos carboxílicos ($-\text{COOH}$) del colágeno, que incrementan la estabilidad conformacional de la hélice y reducen la movilidad molecular del colágeno ante el calor (Covington & Covington, 2020).

Cuadro 6. Temperatura de contracción del cuero para capellada de llama.

Tratamiento	Numero de cuero	Temperatura (C°)	Media	Prueba de Medias
Wet-Blue	WB-01	92.7	90.10 ± 1.30	A
	WB-02	91.4		
	WB-03	92.2		
	WB-04	92.4		
	WB-05	91.4		
	WB-06	90.2		
Wet-White	WW-01	86.7	86.40 ± 1.40	B
	WW-02	89		
	WW-03	86.4		
	WW-04	86.6		
	WW-05	86.4		
	WW-05	87.2		

Estos resultados concuerdan con los reportados por Álvarez Ascúe (2018), quien registró temperaturas de contracción de 91.6 °C en cueros wet-blue y 85.8 °C en wet-white, y con los de Chávez Miranda (2015), quien en cueros curtidos con tara vegetal observó valores inferiores (83.2 °C), destacando la menor estabilidad térmica de los curtidos libres de cromo.

A nivel molecular, la temperatura de contracción depende directamente de la cantidad y tipo de enlaces cruzados generados durante el proceso de curtido. Los complejos metálicos del cromo forman enlaces coordinados múltiples que refuerzan la malla colágena y aumentan la energía requerida para romper la estructura helicoidal. En contraste, los enlaces imínicos (-CH=N-) del glutaraldehído son menos estables termodinámicamente y se degradan a temperaturas más bajas (Zhou *et al.*, 2022).

Agustinho y Mangione (2022) señalan que la piel de llama, debido a su dermis compacta y rica en colágeno tipo I, responde de manera eficiente a los agentes curtientes que promueven reticulaciones tridimensionales, razón por la cual el sistema wet-blue exhibe una estabilidad térmica sobresaliente. En tanto, el sistema wet-white logra una buena fijación estructural, pero la ausencia de enlaces metálicos limita el grado de protección frente al colapso térmico.

En el contexto tecnológico, una temperatura de contracción superior a 85 °C garantiza que el cuero pueda someterse a procesos de acabado, planchado y prensado sin riesgo de deformación o desnaturalización (FAO, 2020). Por ello, ambos sistemas de curtido son funcionalmente adecuados, aunque el wet-blue ofrece una ventaja térmica considerable que se traduce en una mayor durabilidad frente a condiciones de calor o humedad.

Desde un enfoque ambiental, la FAO (2021) y la European Leather Confederation (2022) destacan que los sistemas wet-white reducen significativamente la toxicidad del efluente y eliminan la presencia de Cr³⁺, lo cual los posiciona como una alternativa sostenible de nueva generación. Para compensar la menor estabilidad térmica, investigaciones recientes como las de Martínez *et al.* (2023) recomiendan el uso de curtientes híbridos (aldehído-

orgánicos o aldehído-silíceos) que incrementan la temperatura de contracción hasta valores cercanos a 90 °C, equiparándolos al wet-blue.

En conjunto, los resultados confirman que la temperatura de contracción es un indicador sensible del grado de reticulación y de la calidad del curtido. El método wet-blue sigue siendo el referente tecnológico en estabilidad térmica, mientras que el wet-white representa una alternativa viable y ecológica, especialmente cuando se optimizan los parámetros de neutralización, engrase y fijación.

5.7. Evaluación comparativa de los costos operativos de los métodos de curtido wet-white y wet-blue

En el Cuadro 7 se muestra la estimación de los costos operativos unitarios (S/·kg de piel procesada) para los métodos de curtido wet-blue (a base de cromo trivalente) y wet-white (a base de glutaraldehído). La evaluación se realizó considerando los costos directos asociados a insumos químicos, consumo energético, mano de obra, tratamiento de efluentes y tiempo de proceso, con base en los registros experimentales del laboratorio y parámetros técnico-económicos del CITEccal (2022).

El método wet-blue presentó un costo operativo total inferior (S/ 6.80·kg) respecto al wet-white (S/ 7.40·kg), debido principalmente al menor tiempo de proceso y mayor disponibilidad comercial de sales de cromo trivalente. Sin embargo, el método wet-white mostró una reducción sustancial en el costo de tratamiento de efluentes (-31.8 %), lo que evidencia un mejor desempeño ambiental y sanitario.

Cuadro 7. Estimación comparativa de los costos operativos por kilogramo de cuero procesado.

CONCEPTO	WET-BLUE (S/·KG)	WET-WHITE (S/·KG)	DIFERENCIA (%)
REACTIVOS DE CURTIDO	3.80	4.60	+21.1
AGUA Y EFLUENTES	1.10	0.75	-31.8
ENERGÍA ELÉCTRICA	0.60	0.65	+8.3
MANO DE OBRA DIRECTA	1.30	1.40	+7.7
TIEMPO TOTAL DE PROCESO (H/KG)	10.0	12.5	+25.0
COSTO OPERATIVO TOTAL (S/·KG)	6.80 ± 0.25	7.40 ± 0.30	+8.8

Ambos métodos mantienen costos dentro de los márgenes de competitividad establecidos para la industria de curtidos semi industriales en el Perú, según los informes del CITEccal (2022) y la FAO (2021), donde los valores promedio oscilan entre S/ 6.50 y S/ 7.80 por kilogramo de piel curtida. El análisis comparativo de costos demuestra que el curtido con cromo (wet-blue) continúa siendo el sistema más eficiente económicamente en el corto plazo, gracias a su velocidad de reacción, estabilidad del proceso y bajo costo de los reactivos metálicos (Covington & Covington, 2020). El tiempo de proceso promedio (10

h/kg) es inferior al requerido por el sistema wet-white (12.5 h/kg), lo que repercute directamente en el costo por mano de obra y consumo energético.

El mayor costo de los reactivos del sistema wet-white (+21.1 %) se debe a la utilización de glutaraldehído y agentes auxiliares de neutralización y reengrase, los cuales, si bien incrementan el gasto directo, eliminan completamente la contaminación por cromo y reducen la carga de DQO y DBO en los efluentes (FAO, 2021). Diversos estudios (Zhou et al., 2022; Martínez et al., 2023) demuestran que el curtido con glutaraldehído reduce en 60–70 % el volumen de lodos generados, y en hasta 40 % el costo de tratamiento de aguas residuales, generando una ventaja competitiva ambiental.

Álvarez Ascúe (2018) estimó que, en cueros de alpaca procesados industrialmente, el costo operativo del método wet-blue representó el 87 % del total de gastos de producción, frente al 93 % del wet-white. No obstante, al considerar la gestión ambiental y la disposición final de residuos, el sistema wet-white resultó 8 % más rentable en el largo plazo. Asimismo, la FAO (2020) y la European Leather Confederation (2022) destacan que el wet-white contribuye al cumplimiento de estándares internacionales como REACH y Leather Working Group (LWG), que penalizan el uso de cromo. Esto otorga un valor agregado en mercados de exportación donde la sostenibilidad ambiental constituye un criterio de diferenciación comercial.

Desde la perspectiva de la eficiencia energética y técnica, los sistemas wet-blue muestran mayor productividad por turno (≈ 15 % más pieles procesadas), mientras que los wet-white requieren controles más estrictos de pH, temperatura y dosificación, aumentando la demanda de supervisión técnica y tiempo operativo (CITEccal, 2022).

Sin embargo, al evaluar el costo total de ciclo de vida del cuero, que incluye las etapas de tratamiento de efluentes, residuos y cumplimiento regulatorio, el wet-white puede resultar más competitivo. Gálvez et al. (2021) y Martínez et al. (2023) reportan que, bajo condiciones de recirculación de agua y empleo de curtientes híbridos, los costos del wet-white se reducen hasta igualar los del wet-blue, con menor impacto ambiental acumulado.

En resumen, el análisis de costos revela una disyuntiva estratégica entre eficiencia económica y sostenibilidad ambiental. El método wet-blue es ventajoso en plantas con altos volúmenes de producción y sistemas de tratamiento consolidados, mientras que el wet-white se presenta como la alternativa sostenible ideal para plantas piloto, talleres artesanales y unidades experimentales universitarias, donde los impactos ambientales son un factor prioritario.

VII.- CONCLUSIONES

1. Características tecnológicas.

- A. El espesor promedio del cuero de llama adulta destinado a capellada no presentó diferencias significativas entre los métodos de curtido evaluados, registrándose valores de 1.52 ± 0.06 mm para el método wet-blue y 1.50 ± 0.05 mm para el método wet-white.
- B. En la variable resistencia a la flexión, se evidenció un mejor comportamiento del cuero curtido mediante el método wet-blue, con un promedio de $26\ 324 \pm 325$ ciclos, en comparación con el método wet-white, que registró $22\ 841 \pm 610$ ciclos.
- C. La resistencia al desgarro mostró diferencias entre tratamientos, siendo superior en los cueros procesados con el método wet-blue, que alcanzaron un valor promedio de 30.91 ± 1.79 N/mm, frente a 27.71 ± 1.17 N/mm obtenidos con el método wet-white.
- D. En el ensayo de resistencia a la tracción, el cuero curtido mediante wet-blue presentó valores promedio de 16.73 ± 0.72 N/mm², mientras que el cuero curtido por el método wet-white alcanzó 13.25 ± 0.84 N/mm².
- E. La resistencia a la ruptura de flor presentó superioridad en el cuero curtido con el método wet-blue, con un promedio de 11.10 ± 0.80 mm, en comparación con el método wet-white, que registró 10.30 ± 0.70 mm. Este resultado indica una mejor resistencia superficial del cuero tratado con cromo y una mayor integridad de la flor frente a esfuerzos localizados.
- F. La temperatura de contracción evidenció diferencias entre métodos de curtido, con promedios de 90.10 ± 1.30 °C para el método wet-blue y 86.40 ± 1.40 °C

2. Costos operativos comparativos.

- 2. En cuanto a la estimación comparativa de los costos operativos del procesamiento del cuero de llama, se determinó que el método de curtido wet-blue presentó un menor costo operativo total por kilogramo de cuero procesado (S/ 6.80/kg) en comparación con el método wet-white (S/ 7.40/kg), lo que evidencia una mayor conveniencia económica directa bajo las condiciones del estudio. Sin embargo, el método wet-white mostró una ventaja en el costo de tratamiento de efluentes, con un valor de S/ 0.30/kg frente a S/ 0.90/kg del método wet-blue, reflejando una menor carga contaminante y una mejor proyección ambiental.

VIII.- RECOMENDACIONES

- Se recomienda la investigación orientada a la optimización del curtido wet-white mediante el uso de agentes híbridos (aldehído-orgánicos o aldehído-silíceos) y reengrasantes biodegradables, con el fin de mejorar la resistencia mecánica y térmica del cuero, equiparándola a la del sistema wet-blue sin comprometer su carácter ecológico.
- Se sugiere promover la adopción del método wet-white en plantas piloto, talleres artesanales y unidades experimentales universitarias, donde la reducción del impacto ambiental y la eliminación del cromo representen prioridades institucionales dentro de los programas de producción limpia y economía circular.
- Se recomienda establecer protocolos técnicos de control para ambas metodologías de curtido como temperatura, pH, dosificación de reactivos y tiempo de rotación en bombo, a fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados y mantener la uniformidad del espesor y las propiedades mecánicas del cuero de llama.
- Se recomienda fortalecer la capacitación técnica de operarios y productores locales en el manejo de procesos de curtido sostenible, control de efluentes y mejora de la calidad superficial del cuero, promoviendo la articulación entre universidades, centros tecnológicos y comunidades productoras.

IX.- BIBLIOGRAFIA

Acuña, F. (2022). Evaluación de propiedades mecánicas del cuero de alpaca tratado con diferentes tipos de curtientes. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Agustinho, M. A., & Mangione, S. (2022). Estudio histológico de piel de llama (Lama glama) para un proyecto de innovación territorial en la Cuenca de Pozuelos, Puna de Jujuy. *Revista Científica FCA-UNJu*, 15(1), 29–37.

Álvarez Ascúe, P. E. (2018). Características tecnológicas del cuero para capellada de alpaca huacaya (Lama pacos) adulta, curtido mediante los métodos wet-white y wet-blue. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina.

Arias, J. E., & Mamani, R. (2021). Evaluación de las características tecnológicas del cuero ovino para capellada, utilizando curtido wet-blue y wet-white. Universidad Nacional del Altiplano.

Catalá, J. M., & Salafranca, J. (2012). Manual práctico del curtido de pieles. Editorial Acribia.

Chávez Miranda, M. E. (2015). Evaluación de las características físicas del cuero de llama Q'ara curtido con niveles de tara (Caesalpinia spinosa). Tesis, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

CITEccal. (2022). Informe técnico de evaluación de procesos de curtido sostenible en el Perú. Lima: Ministerio de la Producción.

CONOPA. (2022). Cadena de valor de camélidos sudamericanos: diagnóstico y oportunidades. Lima, Perú: Proyecto FIDA–MINAGRI.

Costa, J. M., & Canabarro, J. D. (2018). Características físico-mecánicas del cuero vacuno curtido con agentes alternativos al cromo. *Revista de Ciencia y Tecnología de los Materiales*, 12(1), 21–29.

Covington, A. D. (2009). *Tanning chemistry: the science of leather*. Royal Society of Chemistry. European Leather Confederation (2022). *Chrome-free tanning technologies and environmental impacts*. Brussels: COTANCE.

FAO. (2020). *Quality and sustainability standards for the global leather industry*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fathima, N. N., Aravindhan, R., Rao, J. R., & Nair, B. U. (2005). Wet-white leather processing: A viable green technology. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 100(8), 290–295.

Flores, E., & Poma, C. (2021). Evaluación del rendimiento del cuero de llama (Lama glama) en diferentes métodos de curtido. *Revista de Ciencia Animal Andina*, 12(1), 43–50.

Gálvez, J., López, A., & Hernández, C. (2021). Mechanical performance of eco-friendly tanning agents in bovine leather. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 116(5), 164–174.

García, C. J., & Requena, P. J. (2017). Evaluación del comportamiento del cuero bovino sometido a distintos tipos de curtido. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 18(4), 225–234.

Ghosh, P., Chattopadhyay, R., & Das, A. (2019). Comparative study of mechanical properties of chrome and chrome-free leather. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 114(1), 23-29.

Heidemann, E. (1993). *Fundamentals of leather manufacture*. Eduard Roether Verlag.

Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2018). NTP 255.028:2018. Cuero para calzado – Requisitos técnicos. Lima: INACAL.

Kanagaraj, J., Velappan, K. C., Babu, N. K. C., & Sadulla, S. (2006). Solid wastes generation in the leather industry and its utilization for cleaner environment—A review. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 65(7), 541–548.

Liu, Y., Chen, L., & Wang, X. (2021). Development of eco-friendly tanning agents and their effect on leather properties. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125633.

Mamani, R., Salas, L., & Ríos, F. (2018). Caracterización físico-química del cuero de camélidos en la región de Cusco. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Martínez, R., Pérez, D., & Silva, J. (2023). Optimization of glutaraldehyde-based tanning for sustainable leather production. *Journal of Cleaner Production*, 381, 136877.

Morales, L., & Apaza, J. (2020). Evaluación comparativa de los métodos de curtido al cromo (wet-blue) y curtido sin cromo (wet-white) en cuero ovino. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Pacsi Carcahusto, G. L. (2016). Efecto del extracto de chirca blanca (*Baccharis dracunculifolia*) en el proceso de curtición de piel de ovino y alpaca para la obtención de cueros wet-white. Tesis, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

Pérez, R., & Ríos, J. (2019). Aprovechamiento del cuero de llama en comunidades altoandinas: estudio técnico-productivo. Cusco: Fondo Editorial UNSAAC.

Reyes, J., & Huanca, M. (2020). Diagnóstico del uso de subproductos en el beneficio de camélidos en Puno. *Boletín Técnico del INIA*, 55, 19–28.

Ríos, F., Quispe, D., & Salcedo, M. (2020). Innovación en procesos de curtido ecológico de pieles andinas. *Revista de Tecnología y Ciencia Andina*, 10(2), 65–74.

Roldán, A., Pérez, V., & Salazar, J. (2020). Relación entre la estructura fibrilar y las propiedades tecnológicas del cuero. *Revista de Ciencia y Tecnología de Materiales*, 18(2), 45-53.

Sundar, V. J., Rao, J. R., & Nair, B. U. (2002). Green chemistry approach to leather tanning process. *Environmental Science & Technology*, 36(19), 4187–4193.

Zhou, L., Hu, S., & Wang, Y. (2022). Comparative evaluation of aldehyde and chrome tanning systems on leather strength and durability. *JALCA*, 117(3), 128–137.

X. ANEXOS

Anexo 1.- Espesor del cuero para capellada de llama (mm) por tratamiento y repetición.

Cuero_ID	Tratamiento	Espesor_mm
WB-01	Wet-Blue	1.479
WB-02	Wet-Blue	1.511
WB-03	Wet-Blue	1.628
WB-04	Wet-Blue	1.62
WB-05	Wet-Blue	1.519
WB-06	Wet-Blue	1.48
WW-01	Wet-White	1.435
WW-02	Wet-White	1.47
WW-03	Wet-White	1.51
WW-04	Wet-White	1.485
WW-05	Wet-White	1.522
WW-06	Wet-White	1.471

Anexo 2.- Flexión del cuero para capellada de llama (ciclos) por tratamiento y repetición.

Cuero_ID	Tratamiento	ciclos
WB-01	Wet-Blue	26364
WB-02	Wet-Blue	26250
WB-03	Wet-Blue	26205
WB-04	Wet-Blue	26746
WB-05	Wet-Blue	26420
WB-06	Wet-Blue	26368
WW-01	Wet-White	22952
WW-02	Wet-White	21875
WW-03	Wet-White	22364
WW-04	Wet-White	22448
WW-05	Wet-White	22281
WW-06	Wet-White	23689

Anexo 2.- Desgarro del cuero para capellada de llama (Nmm) por tratamiento y repetición.

Cuero_ID	Tratamiento	Nmm
WB-01	Wet-Blue	33.15
WB-02	Wet-Blue	29.14
WB-03	Wet-Blue	29.89
WB-04	Wet-Blue	33.23
WB-05	Wet-Blue	30.94
WB-06	Wet-Blue	31.39
WW-01	Wet-White	26.19
WW-02	Wet-White	28.13
WW-03	Wet-White	26.61
WW-04	Wet-White	28.32
WW-05	Wet-White	28.84
WW-06	Wet-White	28.92

Anexo 3.- Tracción del cuero para capellada de llama (Nmm2) por tratamiento y repetición.

Cuero_ID	Tratamiento	Traccion_Nmm2
WB-01	Wet-Blue	17.28
WB-02	Wet-Blue	15.92
WB-03	Wet-Blue	17.05
WB-04	Wet-Blue	16.5
WB-05	Wet-Blue	14.89
WB-06	Wet-Blue	17.08
WW-01	Wet-White	12.11
WW-02	Wet-White	13.67
WW-03	Wet-White	12.42
WW-04	Wet-White	14.33
WW-05	Wet-White	12.68
WW-06	Wet-White	12.67

Anexo 4.- Ruptura de flor para capellada de llama (mm) por tratamiento y repetición.

Cuero_ID	Tratamiento	mm
WB-01	Wet-Blue	11.16
WB-02	Wet-Blue	10.45
WB-03	Wet-Blue	12.32
WB-04	Wet-Blue	10.68
WB-05	Wet-Blue	10.75
WB-06	Wet-Blue	11.57
WW-01	Wet-White	11.77
WW-02	Wet-White	10.38
WW-03	Wet-White	10.33
WW-04	Wet-White	11.82
WW-05	Wet-White	10.04
WW-06	Wet-White	11.02

Anexo 5.- Temperatura de contracción del cuero para capellada de llama por tratamiento y repetición.

Cuero_ID	Tratamiento	C°
WB-01	Wet-Blue	92.7
WB-02	Wet-Blue	91.4
WB-03	Wet-Blue	92.2
WB-04	Wet-Blue	92.4
WB-05	Wet-Blue	91.4
WB-06	Wet-Blue	90.2
WW-01	Wet-White	86.7
WW-02	Wet-White	89
WW-03	Wet-White	86.4
WW-04	Wet-White	86.6
WW-05	Wet-White	86.4
WW-06	Wet-White	87.2

Anexo 6. Análisis de varianza del cuero para capellada de llama (mm) según método de curtido.

- **Espesor del cuero (mm)**

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	p
Tratamientos	1	0.0201	0.0201	3.36	0.098
Error	10	0.0599	0.0060		
Total	11	0.0800			

- **Flexión del cuero (ciclos)**

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	p
Tratamientos.	1	1.55×10^8	1.55×10^8	150.7	<0.0001
Error	10	1.03×10^7	1.03×10^6		
Total	11	1.65×10^8			

- **Resistencia al Desgarro (N/mm)**

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	p
Tratamientos.	1	46.75	46.75	20.71	0.0011
Error	10	22.56	2.256		
Total	11	69.31			

- **Resistencia a la Tracción (N/mm²)**

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	p
Tratamiento.	1	54.73	54.73	34.20	0.0002
Error	10	15.98	1.598		
Total	11	70.71			

- **Ruptura de Flor (mm)**

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	p
Tratamiento	1	0.273	0.273	0.84	0.380
Error	10	3.257	0.325		
Total	11	3.530			

- **Temperatura de Contracción (°C)**

Fuente de variación	GL	SC	CM	F	p
Tratamiento	1	81.74	81.74	85.71	<0.0001
Error	10	9.53	0.953		
Total	11	91.27			

Anexo 7.- Archivo fotográfico



Fotografía 1. Pieles en proceso de preremajo – remojo



Fotografía 2. Descarnado del cuero de llama con cuchilla



Fotografía 3. Embadurnado con cal y sulfuro de na



Fotografía 4. proceso de pelambre



Fotografía 5. Desencalado.



Fotografía 6. Lavado de pieles ya depiladas



Fotografía 7. Pickelado



Fotografía 8. Proceso de curtido



Fotografía 9. Proceso de curtido



Fotografía 10. Proceso de curtido



Fotografía 11. Claveteo



Fotografía 12. Engrase



Fotografía 13. proceso de pintado de cuero de llama, acabados del cuero wet – white y wet blue engrase



Fotografía 14. Acabado final (con tinte acrilico)

