

Evaluación de la reproducibilidad de la ISO 20136 para la biodegradación del cuero curtido: análisis longitudinal y validación estadística

Marcelo Bertazzo^{1*}, Alex Migallón², Margarita Rodríguez Álvarez², Elena Orgilés Calpena¹.

1. INESCOP. Centro Tecnológico del Calzado. PI Campo Alto. C/Alemania 102. Elda (Alicante), España.
2. Universidad de Alicante, Departamento de Matemáticas. C/ San Vicente del Raspeig. San Vicent del Raspeig (Alicante), España.

* mbertazzo@inescop.es

Resumen

La norma ISO 20136:2020 (Leather — Determination of degradability by micro-organisms) establece un protocolo estandarizado para evaluar la biodegradabilidad de cueros curtidos mediante un inóculo procedente de sistemas biológicos de depuración de aguas residuales. A lo largo de un periodo de incubación de 28 días, el método permite estimar el potencial de biodegradación bajo condiciones ambientales simuladas. Las metodologías estandarizadas son esenciales para generar datos reproducibles y representativos que se aproximen a los procesos reales de degradación. No obstante, la fiabilidad del método depende en gran medida de su reproducibilidad, especialmente frente a la variabilidad biótica (p. ej., actividad del inóculo) y abiótica (p. ej., temperatura, pH, humedad).

En este estudio se analizaron 15 experimentos de biodegradación, que en conjunto sumaron aproximadamente 11.000 horas de ensayo, realizados entre 2019 y 2025, empleando dos materiales de referencia consistentes: colágeno (control positivo) y cuero curtido con oxazolidina (control interno). El objetivo fue determinar si las variaciones temporales y estacionales en las propiedades del inóculo influían significativamente en los resultados de biodegradación. Se aplicó un enfoque de normalización usando el colágeno como línea base de referencia. La validación estadística incluyó contrastes de hipótesis, evaluación de normalidad, análisis de varianza y correlación lineal.

Los resultados mostraron una fuerte correlación entre el colágeno y el cuero curtido con oxazolidina ($R^2 = 0,99$), sin diferencias significativas en los valores medios tras la normalización. La reproducibilidad se confirmó mediante un coeficiente de variación (CV) del 10,94% y un rango intercuartílico relativo del 15,11%, ambos dentro de los umbrales aceptados para ensayos biológicos. Este enfoque refuerza la robustez metodológica de la ISO 20136 frente a fluctuaciones experimentales, permitiendo una interpretación más consistente y conservadora de los datos de biodegradación, crítica para estudios comparativos y para la validación de materiales biodegradables.

Palabras clave: ISO 20136:2020; Biodegradación; Cuero curtido; Reproducibilidad; Validación estadística.

1. Introducción

La industria del cuero representa un sector estratégico de la economía global, no solo por su capacidad de generar valor añadido, sino también por su papel esencial en industrias como la moda, la automoción y la tapicería [1]. Más allá del suministro de materiales de alta calidad, esta industria actúa como un motor económico clave.

En el contexto europeo, el sector del cuero y los productos de cuero comprende aproximadamente 36.000 empresas, emplea directamente a alrededor de 435.000 personas y generó una facturación estimada de 48.000 millones de euros en 2021 [2]. La producción está muy diversificada: el 41% se destina al calzado, el 19% a marroquinería, el 17% a mobiliario y el 13% a la industria de automoción [2], lo que refleja su relevancia transversal en distintas cadenas de valor.

Desde el punto de vista regulatorio, la gestión de residuos en este sector ha estado tradicionalmente regida por la Directiva 1999/31/CE sobre vertido y la Directiva 2008/98/CE sobre residuos [4][7].

Estas normativas permitían la incineración o el vertido de residuos sólidos, como recortes de cuero o virutas con contenido en cromo. Sin embargo, la entrada en vigor de la Directiva (UE) 2018/850 el 1 de enero de 2025 introduce restricciones significativas, prohibiendo explícitamente tanto el vertido como la incineración de residuos textiles industriales [6].

Esta medida impacta directamente en los residuos generados por la industria del cuero debido a sus similitudes composicionales y ambientales con los residuos textiles.

Como respuesta a este nuevo marco normativo, la industria europea del cuero está transitando hacia modelos de producción más sostenibles.

Esto incluye la adopción de prácticas de fabricación responsables, la reducción del uso de compuestos peligrosos como el cromo [5][6], y el fomento del desarrollo de productos biodegradables que puedan compostarse al final de su vida útil [8].

Iniciativas como la sustitución de agentes de curtición tradicionales por alternativas libres de cromo, junto con tratamientos de acabado más sostenibles, representan un punto de inflexión para el sector [8]. Asimismo, la implementación de directrices modernas de fabricación, como el uso de materiales de origen renovable, impulsa procesos más limpios y trazables [9].

Esta transformación se alinea con el Pacto Verde Europeo y, en particular, con la Estrategia de la UE para Textiles Sostenibles y Circulares [3], que establece una hoja de ruta para reconfigurar el sector hacia una economía resiliente, eficiente en recursos y competitiva. Esta estrategia fomenta la innovación tecnológica, el ecodiseño y la circularidad de materiales, incluido el cuero.

En este contexto, la integración de criterios ambientales en el diseño de producto, la mejora de los procesos de curtición y la trazabilidad de los flujos de residuos industriales se convierten en pilares clave para asegurar el cumplimiento normativo y la sostenibilidad a largo plazo del sector.

El cuero es un material duradero y flexible derivado de pieles de origen animal. Está compuesto principalmente por fibras de colágeno, que representan aproximadamente el 90% de su contenido proteico [10].

Los componentes restantes incluyen elastina, queratina, diversos lípidos, minerales y agua. La red tridimensional de fibras de colágeno entrelazadas confiere al cuero su resistencia, flexibilidad y capacidad de soportar desgarros [11].

El proceso de curtición modifica químicamente la estructura del colágeno para mejorar su estabilidad y conferir propiedades deseadas [12]. Se emplean diferentes agentes curtientes para estabilizar y preservar el cuero mediante mecanismos químicos diversos [13].

Aunque la curtición aumenta significativamente la durabilidad y la vida útil de los productos de cuero, también afecta a su biodegradabilidad y a su impacto ambiental [14]. La descomposición del cuero es un proceso biológico complejo influido por diversos grupos microbianos, en el que las bacterias desempeñan un papel clave [15]. Estos microorganismos producen enzimas especializadas, como proteasas y lipasas, que permiten la degradación de proteínas, lípidos y agentes curtientes presentes en el cuero [16].

A través de estas actividades enzimáticas, los microorganismos inician una cascada de reacciones bioquímicas que degrada gradualmente la estructura del cuero y altera sus propiedades físicas [17].

La velocidad de biodegradación del cuero está influída por varios factores, incluyendo el tipo de agente curtiente utilizado, el propio proceso de curtición y las condiciones ambientales (factores bióticos y abióticos).

Esto hace que el desarrollo de cueros más sostenibles, que cumplan con las exigencias regulatorias y presenten mayores tasas de degradación al final de su vida útil, sea un reto técnico relevante para el sector.

Para apoyar este objetivo, se requieren métodos de ensayo en laboratorio que permitan evaluar el comportamiento degradativo de nuevos materiales sin necesidad de períodos prolongados ni ensayos de campo que pueden durar años.

La mayoría de los métodos estandarizados para evaluar la biodegradabilidad fueron diseñados originalmente para materiales plásticos [18][19][20], con períodos de ensayo de 90 a 180 días. En 2017 se publicó la norma ISO 20136:2017, “Leather — Determination of degradability by microorganisms”, específica para cuero, posteriormente actualizada en 2020 [21].

Esta metodología utiliza un consorcio microbiano complejo derivado de aguas residuales urbanas y/o de curtiduría como inóculo en un medio líquido, evaluando la biodegradación mediante la cuantificación del CO₂ generado. Una de sus principales ventajas es la duración relativamente corta del ensayo (alrededor de 30 días), lo que permite una evaluación rápida del potencial degradativo de cueros de nueva generación.

No obstante, esta respuesta rápida debe estar respaldada por la fiabilidad metodológica y la reproducibilidad de los resultados en el tiempo. Dado el uso de inóculos microbianos complejos, como aguas procedentes de tanques biológicos de curtidurías, plantas municipales o una mezcla de ambas, no es factible una estandarización microbiana estricta.

Por tanto, garantizar la reproducibilidad de los resultados, con independencia del origen geográfico del inóculo o de la estación en la que se recolectaron las aguas residuales, es esencial para validar científicamente la biodegradabilidad de un material de cuero.

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la reproducibilidad del ensayo de biodegradación de cuero según la ISO 20136:2020. Para asegurar la trazabilidad y minimizar la variabilidad experimental, todos los ensayos se realizaron utilizando una única muestra representativa de un mismo material modelo: cuero bovino curtido con oxazolidina.

Además, se evaluó la influencia de inóculos microbianos recolectados en diferentes estaciones (primavera, verano, otoño e invierno) a lo largo de un período de cinco años (2020–2025).

Debido a la duración del ensayo (30 días), se llevaron a cabo un total de 15 réplicas independientes. En cada ensayo se utilizó colágeno puro como control positivo, tal como especifica la ISO 20136:2020.

El porcentaje de biodegradación del cuero se calculó en relación con el valor obtenido para el colágeno, considerado como referencia del 100%. A partir de este valor se calculó la biodegradación relativa de la muestra de cuero curtido.

Esta metodología permite comparar de forma sistemática la degradabilidad del cuero ensayado frente al comportamiento del colágeno bajo condiciones experimentales idénticas, asegurando así la consistencia y la comparabilidad de los resultados.

2. Material y método

2.1. Equipamiento

Los ensayos se llevaron a cabo utilizando un equipo desarrollado por INESCOP específicamente para cumplir con la ISO 20136:2020. El sistema de INESCOP (Figura 1) se basa en el Método B de la norma, en el que la biodegradación se determina cuantificando el CO₂ producido durante la degradación del colágeno. Esto se logra mediante detección infrarroja directa y monitorización continua de la concentración de CO₂.

El equipo está diseñado para medir los niveles de CO₂ de múltiples muestras ubicadas en reactores independientes.

El CO₂ generado durante el proceso de degradación microbiana se detecta mediante un sensor infrarrojo. El flujo de aire de cada reactor se dirige a través de un sistema multiplexado que incorpora un tambor giratorio con múltiples canales de entrada; la salida de aire de cada reactor se conecta a una de estas entradas.

El tambor dispone de una única salida conectada a un detector de caudal y, posteriormente, a una celda de medida sellada que contiene el sensor infrarrojo de CO₂.

El sistema registra automáticamente los datos resultantes de caudal, concentración de CO₂, presión atmosférica y temperatura mediante un sistema de adquisición de datos conectado a un ordenador.

Este montaje innovador permite evaluar el potencial de biodegradación del cuero en un periodo relativamente corto. En 30 días, permite determinar el potencial degradativo de un cuero que, en condiciones ambientales naturales, tardaría años. Actualmente, INESCOP opera dos sistemas de este tipo, con capacidades de 16 y 20 reactores, respectivamente.



Figura 1. Equipo de biodegradación en INESCOP

2.2. Descripción y fundamento del método ISO 20136:2020

La biodegradabilidad aerobia de las muestras se evaluó conforme a la ISO 20136:2020, que proporciona un método estandarizado para evaluar la degradación del cuero mediante la acción de microorganismos aerobios.

Este procedimiento es aplicable tanto a cuero curtido como sin curtir, con el objetivo de evaluar su comportamiento al final de vida desde una perspectiva ambiental.

El principio del método se basa en la medida del dióxido de carbono (CO_2) producido durante la descomposición microbiana de la materia orgánica de la muestra, principalmente colágeno. El CO_2 generado procede directamente de la actividad metabólica de un inóculo microbiano activo, típicamente obtenido de aguas residuales de curtiduría, aguas residuales municipales o una mezcla de ambas.

El CO_2 acumulado se utiliza para calcular el grado de biodegradación, expresado como el porcentaje del carbono total de la muestra que se convierte en CO_2 .

Este valor se compara con el contenido teórico de carbono, determinado previamente mediante análisis elemental, lo que permite una cuantificación precisa de la biodegradabilidad del material.

2.3. Muestra

Para evaluar la reproducibilidad de la ISO 20136:2020 se utilizaron dos tipos de materiales de referencia. El colágeno tipo I puro (Sigma®) se empleó como control positivo, tal como establece la norma. El segundo material fue cuero curtido con oxazolidina, que mostró un alto potencial de biodegradación, con una biodegradación relativa superior al 75% en comparación con el colágeno puro, cumpliendo los criterios definidos por la norma.

Esta elevada degradabilidad hace que el cuero curtido con oxazolidina sea un material idóneo como control interno, especialmente útil para estudios interlaboratorio y validación metodológica. En este estudio se utilizó una única piel curtida con oxazolidina, con el fin de minimizar la variabilidad asociada a posibles diferencias en la concentración de agente curtiente, que podrían influir en los resultados de biodegradación.

La oxazolidina es un agente curtiente orgánico sintético utilizado en la industria del cuero como alternativa o complemento a agentes tradicionales, como sales de cromo, taninos vegetales o compuestos basados en aldehídos. Su uso está especialmente extendido en procesos de curtición y recurtición.

La oxazolidina actúa formando enlaces covalentes con los grupos funcionales del colágeno, particularmente con grupos amino, estabilizando así la estructura proteica del material curtido [22].

2.4. Análisis estadístico

Se emplearon diversas herramientas estadísticas para evaluar la reproducibilidad de los ensayos de biodegradación. Dado que la duración de cada ensayo variaba, la escala temporal se normalizó para validar la reproducibilidad como una hipótesis plausible.

Para cada experimento, el tiempo inicial y final se fijaron en 0 y 1, respectivamente. Dentro de este intervalo, los datos se normalizaron además en porcentajes, divididos en incrementos del 5% desde 0% hasta 100%.

Este enfoque se consideró el más apropiado para evaluar la reproducibilidad, ya que la comparación directa de valores de degradación entre 15 ensayos con duraciones entre 400 y 900 horas sería inconsistente.

Esta normalización minimizó el sesgo potencial que podría surgir al comparar resultados en un punto temporal fijo (p. ej., 200 horas) entre ensayos con duraciones totales distintas.

Las técnicas estadísticas aplicadas incluyeron: coeficientes de variación, coeficiente de correlación de Pearson, coeficiente de correlación de concordancia de Lin (CCC), prueba de Kolmogorov, gráficos de Bland–Altman y gráficos de control de calidad (QCC).

El coeficiente de variación indica la variabilidad relativa, es decir, el grado de dispersión respecto a la media. El coeficiente de correlación de Pearson evalúa la relación lineal entre dos curvas experimentales. El coeficiente de Lin evalúa tanto la similitud de la forma como la concordancia en magnitud entre curvas.

La prueba de Kolmogorov, de carácter no paramétrico, determina si dos muestras provienen de la misma distribución. Los gráficos de Bland–Altman muestran las diferencias medias entre dos experimentos a lo largo del tiempo y definen umbrales para evaluar la significación estadística.

Los QCC son gráficos estadísticos de control utilizados para evaluar si un proceso se comporta de forma consistente y estable a través de diferentes ensayos.

3. Resultados y discusión

Tal como se ha descrito previamente, los valores absolutos de biodegradación tanto para el colágeno como para el cuero curtido con oxazolidina se normalizaron para asegurar la consistencia entre resultados. Esto permitió una comparación sistemática de la degradabilidad del cuero ensayado en relación con el comportamiento del colágeno bajo condiciones experimentales idénticas, garantizando coherencia y comparabilidad.

El porcentaje de biodegradación del cuero se calculó en relación con el valor obtenido para el colágeno, considerado como referencia del 100%. Con base en ello, se determinó la biodegradación relativa del cuero curtido con oxazolidina.

El análisis de los 15 ensayos reveló que todas las curvas de degradación fueron muy similares tanto para el colágeno como para el cuero curtido con oxazolidina. Las áreas sombreadas que representan la desviación estándar y los intervalos de confianza del 95% en las figuras fueron estrechas, lo que indica baja variabilidad entre réplicas (Figura 2).

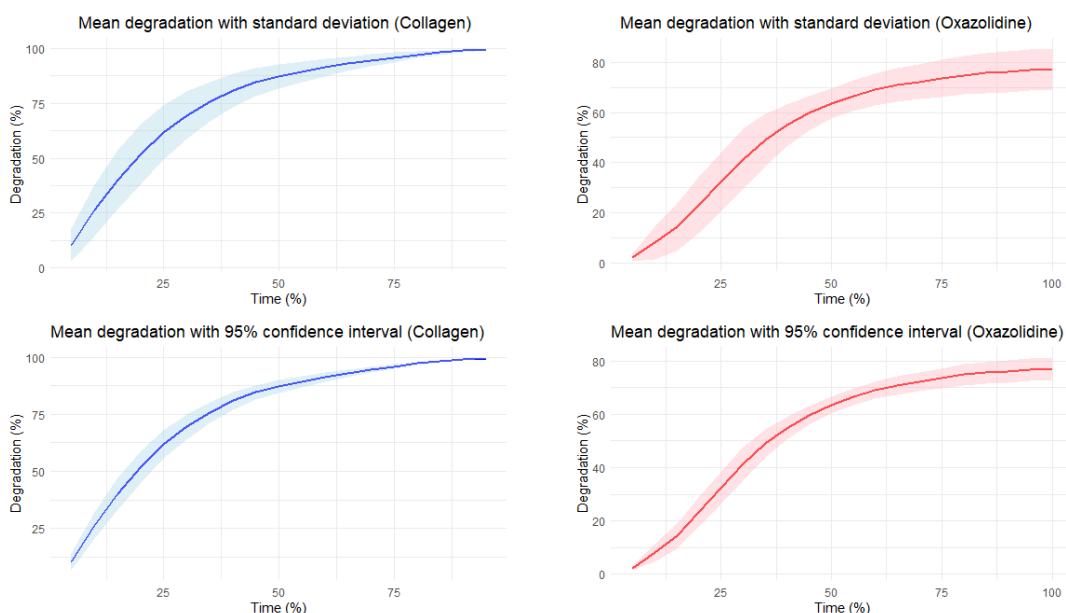


Figura 2. Degradación media con desviación estándar y degradación media con intervalo de confianza del 95%. Colágeno en azul y oxazolidina en rojo.

Para evaluar la variabilidad de las muestras, se calcularon coeficientes de variación (Tablas 1 y 2). Se consideró baja variabilidad cuando los coeficientes fueron inferiores al 12%, un umbral favorable dada la elevada variabilidad intrínseca típicamente observada en ensayos biológicos.

Collagen	
Time (%)	CV (%)
5	70.7
10	44.3
15	33.2
20	26.2
25	19.8
30	15.5
35	12.0
40	9.29
45	7.59
50	6.34
55	5.33
60	4.37
65	3.42
70	2.87
75	2.32
80	1.59
85	1.08
90	0.71
95	0.31

a

Oxazolidine	
Time (%)	CV (%)
5	62.7
10	80.1
15	65.7
20	47.6
25	36.7
30	29.5
35	21.2
40	15.0
45	11.3
50	9.38
55	9.17
60	9.25
65	9.44
70	9.73
75	10.0
80	10.4
85	10.5
90	10.6
95	10.7
100	10.8

b

Tabla 1. Coeficiente de variación de las curvas de biodegradación de colágeno (a) y oxazolidina (b) en los 15 ensayos realizados.

Para ambos tipos de muestra, los coeficientes descendieron por debajo de este umbral a partir de aproximadamente el 35–40% del tiempo normalizado, lo que sugiere que las diferencias en los valores de degradación entre ensayos fueron insignificantes tanto para el colágeno como para la oxazolidina.

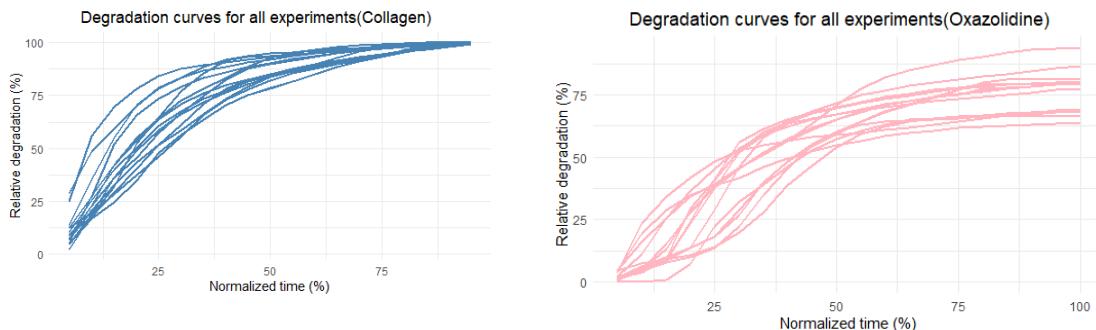


Figura 3. Coeficiente de correlación de Pearson a partir de 15 ensayos para colágeno (azul) y oxazolidina (rojo).

Los coeficientes de correlación de Pearson para las comparaciones de colágeno entre ensayos fueron todos superiores a 0,89, mientras que para la oxazolidina la correlación fue 0,86. Estas altas correlaciones confirman que la cinética de biodegradación del colágeno fue muy similar a lo largo de los 15 ensayos, observándose una tendencia comparable para el cuero curtido con oxazolidina (Figura 3).

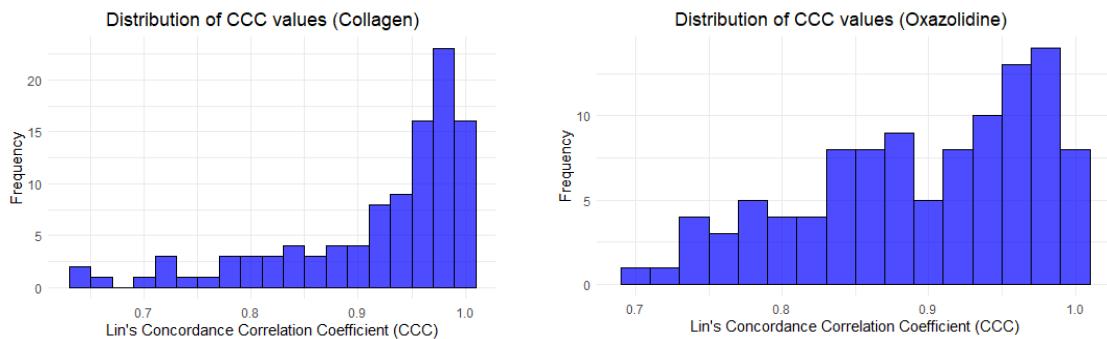


Figura 4. Coeficiente de similitud y de concordancia en magnitud según Lin entre las curvas de biodegradación de colágeno (azul) y oxazolidina (rojo).

Como se ha indicado anteriormente, el coeficiente de correlación de concordancia de Lin evalúa tanto la similitud de la forma como la concordancia en magnitud entre curvas de biodegradación. Tanto para colágeno como para oxazolidina, la mayoría de los valores estuvieron próximos a 1, indicando alta concordancia (Figura 4).

En el caso del colágeno, este resultado era esperable ya que todos los valores se normalizaron a 100%. Para la oxazolidina, aunque no todas las réplicas alcanzaron el mismo valor final de degradación debido a la normalización respecto al colágeno, el coeficiente de Lin se mantuvo elevado, confirmando que las diferencias fueron mínimas.

La prueba de Kolmogorov se aplicó únicamente a los datos de colágeno, ya que las muestras de oxazolidina alcanzaron valores finales de degradación diferentes, introduciendo ligeras variaciones en los valores medios de las curvas que impedían asumir una distribución común.

Para el colágeno, la prueba de Kolmogorov determinó si dos curvas procedían de una distribución común, lo que implicaría un patrón de degradación compartido con pequeñas diferencias individuales, aportando así un sólido respaldo a la reproducibilidad de los resultados de degradación del colágeno.

Para que esta hipótesis sea válida, los valores p deben ser superiores a 0,05. Este criterio se cumplió para todos los pares de ensayos, confirmando que todas las curvas de degradación del colágeno siguieron una distribución común (Figura 5).

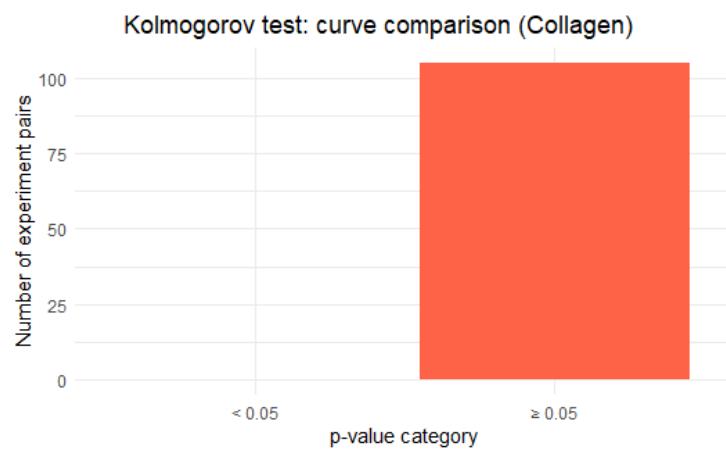


Figura 5. Prueba de distribución común para el colágeno mediante la prueba de Kolmogorov.

Para evaluar si las pequeñas diferencias observadas entre ensayos eran estadísticamente significativas, se generaron gráficos de Bland–Altman para cada par de experimentos de colágeno (Tabla 2, a) y de oxazolidina (Tabla 2, b).

Estos gráficos muestran la diferencia media entre dos ensayos a lo largo del tiempo, definen umbrales de significación y representan las diferencias en cada punto temporal. Se esperaba alrededor de un 5% de valores atípicos para confirmar diferencias no significativas.

Para el colágeno, tanto la media como la mediana estuvieron por debajo del 5%, mientras que para la oxazolidina los valores fueron aproximadamente del 5%, lo que indica que las diferencias entre pares de ensayos no fueron estadísticamente significativas.

Collagen						
Statistic	Minimum	1 st Quartile	Median	Mean	3 rd Quartile	Maximum
Points outside (%)	0.000	0.000	0.000	2.807	5.263	10.526

Oxazolidine						
Statistic	Minimum	1 st Quartile	Median	Mean	3 rd Quartile	Maximum
Points outside (%)	0.000	5.000	5.000	5.238	10.000	15.000

Tabla 2. Evaluación de diferencias estadísticas entre pares de experimentos de colágeno y oxazolidina mediante Bland–Altman.

Finalmente, se emplearon gráficos de control de calidad (QCC) para verificar si la variabilidad observada en las fases iniciales era estadísticamente significativa (Figura 6). Estos gráficos muestran los valores de la pendiente inicial de cada ensayo, la pendiente inicial media y los límites de significación.

Para ambos, colágeno y oxazolidina, ningún punto excedió los límites definidos. Por tanto, aunque la mayor variabilidad se observó al inicio de los ensayos, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas.

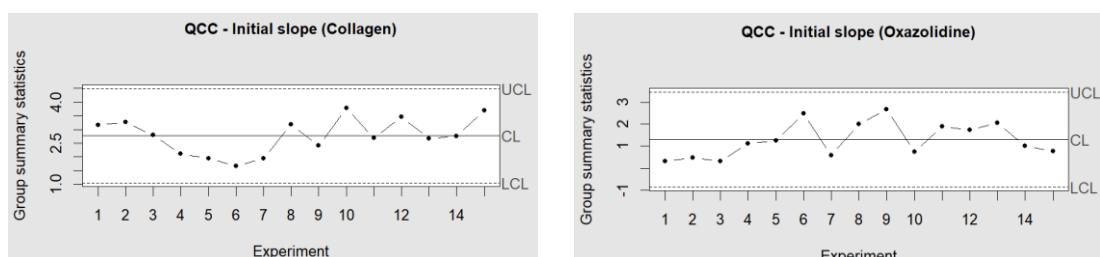


Figura 6. Análisis de la significación de la pendiente inicial en ensayos de biodegradación de colágeno (a) y oxazolidina (b) mediante gráficos de control de calidad (QCC).

4. Conclusiones

Este estudio evaluó la reproducibilidad de los ensayos de biodegradación de cuero en medio líquido siguiendo la norma ISO 20136:2020, utilizando cuero curtido con oxazolidina como material de ensayo y colágeno puro como control de referencia, de acuerdo con el protocolo de la norma.

Para presentar los datos de forma uniforme, los resultados se expresaron como porcentajes de biodegradación relativa, tal como se define en la ISO 20136:2020.

A partir de los análisis estadísticos de 15 ensayos realizados en un periodo de cinco años (2019–2025), pueden extraerse las siguientes conclusiones:

El análisis estadístico del colágeno, tal como se evidencia en la sección de resultados, respalda la hipótesis de reproducibilidad.

Las altas correlaciones entre ensayos, indicadas por los coeficientes de Pearson, CCC y CV, confirmaron este hallazgo. Las diferencias observadas entre ensayos se mantuvieron dentro de límites estadísticamente aceptables, tal como confirmaron los QCC y los gráficos de Bland–Altman.

La prueba de Kolmogorov validó adicionalmente que todas las curvas de degradación del colágeno procedían de una distribución común.

Por el contrario, dado que el colágeno sirvió como referencia de normalización, el cuero curtido con oxazolidina presentó variabilidad en los valores de biodegradación entre ensayos, una característica inherente a los ensayos biológicos. Por ello, no puede concluirse que todas las curvas de degradación de la oxazolidina deriven de una única distribución.

No obstante, los análisis estadísticos indican que las curvas comparten formas y dispersiones similares, aunque con valores medios ligeramente diferentes. En consecuencia, la reproducibilidad sigue siendo una hipótesis válida para estos experimentos.

En conjunto, el análisis exhaustivo de los 15 ensayos, tanto para colágeno como para oxazolidina, confirmó la consistencia de los datos a pesar de las diferencias de año, inóculo y condiciones ambientales (que afectaron únicamente al inóculo, ya que las condiciones de laboratorio se mantuvieron controladas).

Los patrones de degradación observados fueron muy similares entre ensayos, lo que indica que los resultados no se debieron al azar ni a factores circunstanciales, sino que reflejaron un comportamiento estable y repetible.

Por tanto, puede concluirse que los ensayos de biodegradación son reproducibles, reforzando la solidez y fiabilidad de las conclusiones derivadas de los mismos.

5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a Curtidos Segorbe S.L. y a Hidraqua, empresa responsable de la gestión del servicio municipal de agua en Elda, por el suministro continuo de aguas residuales procedentes de sus tanques de tratamiento biológico durante todo el periodo de ensayos. Asimismo, se agradece a IVACE y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) su apoyo financiero en el desarrollo del equipo de biodegradación de INESCOP utilizado en este estudio.

5. Referencias

- [1] Covington, A. D. Tanning Chemistry: The Science of Leather. Royal Society of Chemistry, 2009. ISBN: 978-0-85404-170-1.
- [2] Leather Industry Insight — Pergamena. Available at: <https://www.pergamena.net/blog/v3piyng4zg9ysubox7b1r3zszwrfx8> (accessed on 7 March 2024).
- [3] Business Research Insights. Leather and Allied Products Market. Available at: <https://www.businessresearchinsights.com/es/market-reports/leather-and-allied-products-market-111823>
- [4] Directive 1999/31/EC of the Council of 26 April 1999 on the landfill of waste.
- [5] Alam, N. E., Mia, A. S., Ahmad, F., & Rahman, M. (2020). An Overview of Chromium Removal Techniques from Tannery Effluent. Applied Water Science, 10, 205.

- [6] Boussouga, Y.-A., Okkali, T., Luxbacher, T., & Schafer, A. I. (2023). Chromium (III) and Chromium (VI) Removal and Organic Matter Interaction with Nanofiltration. *Science of the Total Environment*, 885, 163695.
- [7] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives.
- [8] Ding, W. et al. (2022). A Step-Change toward a Sustainable and Chrome-Free Leather Production. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130201.
- [9] Leather Naturally. A Guide to Modern Leather Making. Available at: <https://www.leathernaturally.org/a-guide-to-modern-leather-making/> (accessed on 31 March 2024).
- [10] Narayanan, P.; Janardhanan, S.K. (2024). Collagen and Leather. doi:10.1186/s42825-023-00145-3.
- [11] Bai, Z. et al. (2022). Leather for Bio-Based Flexible and Multifunctional Materials. *Leather Science and Engineering*, 4, 16. doi:10.1186/s42825-022-00091-6.
- [12] Onem, E. et al. (2017). Comparison of Different Tanning Agents. *J Therm Anal Calorim*, 129, 615–622.
- [13] Meyer, M. et al. (2021). Technical Performance of Leather and Alternatives. *Coatings*, 11, 226.
- [14] Vico, A. et al. (2024). Biodegradability and Compostability of Finished Leathers. *Polymers*, 16, 1908.
- [15] Alugoju, P. et al. (2011). Biodegradability of Synthetic Tanning Agents. *Int J Eng Technol*, 3, 302–308.
- [16] Stefan, D. et al. (2012). Microorganisms Capable of Biodegrading Leather Industry Waste. *Mol Cryst Liq Cryst*, 556, 301–308.
- [17] Masi, C. et al. (2021). Alkaline Protease-Producing Bacteria from Leather Effluents. *Ann Microbiol*, 71, 24.
- [18] ISO 14855-1:2012. Ultimate Aerobic Biodegradability of Plastics—CO₂ Analysis.
- [19] ISO 16929:2021. Plastics—Disintegration under Composting Conditions.
- [20] UNE-EN 13432:2001. Packaging Recoverable through Composting and Biodegradation.
- [21] ISO 20136:2020. Leather—Determination of Degradability by Micro-organisms.
- [22]. Roig, M., Segarra, V., Bertazzo, M., Martínez, M. A., Ferrer, J., & Raspi, C. (2012). *Chrome-free leather, tanned with oxazolidine*. Revista de la Asociación de Químicos del Cuero de España, 63(4), 101–110.