

ORIGINAL

Development and Mechanical Evaluation of a Biocomposite Based on Abaca Fiber and Acrylic Resin

Desarrollo y Evaluación Mecánica de un biocompuesto a base de Fibra de Abacá y Resina Acrílica

Angelo Zambrano¹  , Elsa Mora Muñoz¹  , Marco Naranjo Toro¹  

¹Universidad Técnica del Norte. Ibarra, Ecuador.

Citar como: Zambrano A, Mora Muñoz E, Naranjo Toro M. Development and Mechanical Evaluation of a Biocomposite Based on Abaca Fiber and Acrylic Resin. Data and Metadata. 2025; 4:823. <https://doi.org/10.56294/dm2025823>

Enviado: 09-07-2025

Revisado: 06-09-2025

Aceptado: 03-12-2025

Publicado: 04-12-2025

Editor: Dr. Adrián Alejandro Vitón Castillo 

Autor para la correspondencia: Angelo Zambrano 

ABSTRACT

The biocomposite made from a nonwoven abaca fiber reinforced with acrylic resin is proposed as an ecological alternative to synthetic leather. The objective of this research was to develop and characterize the material, evaluating the effect of two variables: the length of the abaca fiber (2 cm and 5 cm) and the concentration of acrylic resin (70 % and 80 %). The manufacturing process consisted of immersing the nonwoven fabric in the resin solution, followed by drying at 120 °C. A completely randomized 2² factorial design was implemented, with a total of 20 experimental runs. The response variables were tensile strength and elongation, evaluated using a Titan 5 James Heal dynamometer under ISO 1421. Statistical analysis was performed using Statgraphics Centurion software and revealed that fiber length has a significant positive effect on tensile strength, while elongation is less relevant. The results obtained with 5 cm fibers and 70 % acrylic resin achieved a tensile strength of 118,3 N; in terms of elongation, the value obtained was 50,2 mm with 2 cm fibers and 70 % resin. Taken together, these findings position vegetable leather as a functional and sustainable material with high potential for application in the textile and composite materials industries.

Keywords: Abaca; Biocomposite; Nonwoven; Elongation; Tensile Strength.

RESUMEN

El biocompuesto elaborado a partir de un no tejido de fibra de abacá reforzado con resina acrílica, se propone como alternativa ecológica al cuero sintético. Esta investigación tuvo como objetivo desarrollar y caracterizar el material, evaluando el efecto de dos variables: la longitud de la fibra de abacá (2 cm y 5 cm) y la concentración de resina acrílica (70 % y 80 %). El proceso de elaboración consistió en la inmersión del no tejido en la solución de resina, seguido de un secado a 120 °C. Se implementó un diseño factorial 2² completamente aleatorizado, con un total de 20 corridas experimentales. Las variables respuesta fueron la resistencia a la tracción y la elongación, evaluadas mediante un dinamómetro Titan 5 James Heal bajo la norma ISO 1421. El análisis estadístico se realiza con el software Statgraphics Centurion, y reveló que la longitud de fibra tiene un efecto positivo significativo sobre la resistencia a la tracción, mientras que la elongación es menos relevante. Los resultados obtenidos con las fibras de 5 cm y 70 % de resina acrílica, logrando una resistencia a la tracción de 118,3 N; en cuanto a la elongación, el valor obtenido fue de 50,2 mm con fibras de 2 cm y 70 % de resina. En conjunto, estos hallazgos posicionan al cuero vegetal como un material funcional y sustentable, con alto potencial de aplicación en la industria textil y de materiales compuestos.

Palabras clave: Abacá; Biocompuesto; no Tejido; Elongación; Resistencia a la Tracción.

INTRODUCCIÓN

Todos los bienes de consumo, incluida la moda, demandan el uso intensivo de recursos, y este sector afronta retos de sostenibilidad sin precedentes: para 2030 se proyecta que su consumo de agua incremente un 50 %, hasta 118 000 millones de m³; su huella de carbono alcance 2791 millones de toneladas de CO₂; y los residuos generados superen los 148 millones de toneladas.⁽¹⁾

El cuero animal se deriva de la piel de los animales y ha sido ampliamente valorado por sus propiedades como: resistencia, durabilidad y biocompatibilidad, con aplicaciones que van desde la moda hasta la biomedicina.⁽²⁾ La piel animal se somete a una serie de tratamientos denominados curtido, se obtiene un material suave. La producción y el procesamiento generan residuos sólidos, líquidos y gaseosos que representan un problema ambiental. Los efluentes se consideran con un alto contenido de cromo (Cr), sales grasas, sulfuro y compuestos orgánicos volátiles. Además, la industria del curtido se caracteriza por un alto consumo de agua, energía y enfrenta retos de sostenibilidad.⁽³⁾ El cuero animal, pese a ser biodegradable y rico en colágeno, su curtido convencional requiere el uso de Cr y glutaraldehído,⁽⁴⁾ el Cr(III) prevalece en el curtido por su estabilidad hidrotermal y excelentes propiedades físicas, su uso genera subproductos peligrosos como oxianiones de cromato y sales de Cr(VI), que representan un grave riesgo ambiental.⁽⁵⁾ La preocupación por la toxicidad del Cr hexavalente en productos de cuero ha llevado al desarrollo de métodos analíticos más sostenibles y accesibles, como la colorimetría asistida por smartphones. Estas innovaciones evidencian la urgencia de reemplazar el curtido con Cr por alternativas libres de metales.⁽⁶⁾ El uso de agentes de curtido convencionales, como el Cr, puede alterar las propiedades químicas originales de las pieles, afectando incluso métodos científicos como la trazabilidad isotópica.⁽⁷⁾ El cuero, sometido a largo plazo en ambientes húmedos y anóxicos, pierde taninos y lípidos, degradando su colágeno.⁽⁸⁾

Ante los impactos ambientales del curtido con Cr, la industria del cuero explora alternativas sostenibles como los taninos vegetales, que han demostrado buen desempeño técnico con menor toxicidad,⁽⁹⁾ los taninos vegetales y los derivados de 1,3,5-triazina, que ofrecen procesos más limpios y eficiente.^(10,11) Los taninos vegetales utilizados como curtientes ecológicos, suelen oscurecer el cuero y aumentar significativamente la carga orgánica de los efluentes,⁽¹²⁾ los taninos de castaño y quebracho elimina moléculas pequeñas y no tanínicas, dando lugar a fracciones que tiñen el cuero en tonos más claros y disminuyen la carga orgánica de los efluentes en un 13,5 % y 19,1 %, respectivamente.⁽¹²⁾ Además, la corteza de *Syzygium cumini* (L.) como posible fuente de taninos para curtido, mide su contenido total de polifenoles y la proporción taninos/no taninos.⁽⁵⁾ Además, la hoja de neem como agente curtiente renovable y eficaz, capaz de sustituir al Cr y taninos convencionales, y de impulsar un curtido ecológico y sostenible.⁽¹³⁾ A su vez la hoja de *Azadirachta* demuestra ser un agente curtiente renovable, produciendo un cuero verde con excelentes propiedades mecánicas, buena adhesión de película y actividad antimicrobiana, validando su reemplazo del Cr y tánicos importados.⁽¹⁴⁾

La industria de la moda busca alternativas sostenibles al cuero animal, desarrollando materiales como biocompuestos derivados de residuos agroindustriales y microbianos,⁽¹⁵⁾ los cuales presentan propiedades mecánicas competitivas y reducen el uso de recursos no renovables,⁽¹⁶⁾ Estos estudios revelan atributos como durabilidad, estética y alineación con valores ecológicos que influyen en su aceptación.⁽¹⁷⁾ Para reducir el impacto ambiental del curtido, la comunidad científica ha investigado algunas fuentes comunes de biocuero como: el látex natural, la piña, los hongos, las medusas y la celulosa bacteriana,⁽¹⁵⁾ las pieles de trucha, un abundante subproducto acuícola, como fuente para un cuero ecológico de alto rendimiento.⁽¹⁸⁾ De igual manera investigadores ha presentado un innovador material similar al cuero, llamado BC-BioLeath (Cuero Bio a Base de Celulosa Bacteriana), demuestra que la celulosa bacteriana, combinada con residuos agroindustriales y procesos de curtido convencionales, puede generar un biocuero de alto rendimiento y coste competitivo, ofreciendo una solución verdaderamente circular y sostenible al sector de la moda.^(19,20) Al transformar residuos agroalimentarios como: residuos de café, bagazo de caña, cáscaras de plátano y pitahaya en biocuero mediante hidrogeles de alginato-calcio con glicerol y aceite vegetal, seguido de un secado a 50 °C, el biocuero de bagazo de caña alcanzó la mayor elongación (29 %) y una resistencia a la tracción 176 N, los biocompuestos se biodegradaron por completo en 21 días.⁽²¹⁾ A su vez, los materiales derivados de micelio han ganado atención como alternativas biodegradables al cuero sintético, aunque su escalabilidad y estandarización aún representan desafíos.⁽²²⁾ Los cueros veganos a base de gel, están elaborados con polímeros naturales y sintéticos, presentan una limitada resistencia mecánica y requieren mejoras mediante compuestos híbridos, nanotecnología y procesos sostenibles para su viabilidad comercial.⁽³⁾

La industria del cuero convencional enfrenta críticas por su impacto ambiental, social y ético, en respuesta a ello se han realizado estudio con materiales como el micelio fúngico han surgido como alternativas sostenibles, aunque aún presentan desafíos técnicos.⁽²³⁾ Como alternativa sostenible al cuero se vegano se elaboró un biocompuesto fúngico multicapa de biomasa de hongos cultivada con residuos de pan se curtió con taninos vegetales, se formaron láminas tratadas con glicerol y aglutinante, logrando resistencia de 20,5 MPa y 14,8 % de elongación y, con rendimiento cercano al cuero natural.⁽²⁴⁾ Los cueros veganos elaborados a partir de cultivos simbióticos de bacterias y levaduras (SCOPY) han mostrado potencial sostenible, aunque aún presentan limitaciones en cuanto a rendimiento y estandarización.⁽²⁵⁾ Estudios recientes han evaluado diferentes sustratos

vegetales como mezclas de té negro y verde como las más eficientes en la producción de celulosa microbiana. ⁽²⁶⁾ Para la elaboración del cuero vegano a base de yute y micelio se realizó a partir de residuos de té negro, se aisló una cepa de *Bacillus subtilis* para producir el biopolímero PHA, utilizado como agente reticulante. Los análisis funcionales y mecánicos evidenciaron mejoras en la resistencia, interconexión del micelio y estabilidad térmica, demostradas mediante SEM y FTIR. Aunque el WVP fue ligeramente inferior al del cuero convencional, las propiedades generales posicionan este material como un sustituto prometedor frente al cuero sintético y animal, con potencial para contribuir a la economía circular. ⁽²⁷⁾ A pesar del auge del cuero vegano, permanece sin explorar de forma sistemática la incorporación de objetos electrónicos como componentes de diseño, lo que limita tanto la diversificación de texturas y acabados sostenibles como la valorización creativa de e-waste en la moda ecológica. ⁽²⁸⁾

La comunidad científica demuestra que el cuero sintético de fibra superfina presenta baja transpirabilidad y escasa sostenibilidad por su origen petroquímico. ⁽²⁹⁾ Además, estudios recientes en movilidad personal han mostrado que el cuero sintético, comúnmente utilizado en prendas como trajes de motociclista, sufre una notable pérdida de resistencia a la tracción tras la exposición prolongada a condiciones exteriores. Esta degradación, asociada principalmente a la radiación ultravioleta que afecta la durabilidad del material, especialmente en su capa superficial de poliuretano. ⁽³⁰⁾ Un estudio reciente desarrolló poliésteres biodegradables reforzados con enlaces de hidrógeno, que aplicados como recubrimiento sobre tejidos de micelio mostraron alta resistencia mecánica, buena textura y más del 60 % de biodegradación. Estos materiales ofrecen un menor impacto ambiental y se perfilan como una alternativa sostenible y eficiente al cuero convencional. ⁽³¹⁾ El presente estudio tiene como objetivo elaborar un biocompuesto a partir de fibras de abacá y resina acrílica, y evaluar la resistencia a la tracción y elongación, peso y espesor, considerando su potencial como sustituto funcional y sostenible frente al cuero animal y sintético.

MÉTODO

Diseño Experimental: se realizó un diseño factorial multinivel 2² con dos factores y dos niveles en cada factor, con un total de 20 tratamientos. El diseño se ejecutó en 5 bloques. El orden de los experimentos es completamente aleatorizado. Los grados de libertad para el error se establecen en 12. Las variables respuesta son: Resistencia a la tracción y elongación, espesor y como factores de estudio se definen: la longitud de fibra de abacá 2 y 5 cm, la resina acrílica al 70 y 80 %, para el análisis se utiliza el software estadístico STATGRAPHICS Centurión Versión 16.1.18.

El biocompuesto fue elaborado en el laboratorio de la Carrera de Textiles de la Universidad Técnica del Norte a partir de fibras de abacá de la variedad Bungalanón, látex natural como aglutinante y resina acrílica. Para su elaboración se llevó a cabo mediante una secuencia de etapas experimentales: 1. Las fibras de abacá fueron sometidas a un proceso de tratamiento previo en una solución aniónica (2 cm³/L, relación de baño 1:20) a 40 °C durante 20 minutos, con el fin de eliminar impurezas que pudieran afectar a la adhesión y cohesión del material. Posteriormente, se enjuagaron con agua y se secaron bajo sombra. 2. Para la formación del no tejido las fibras tratadas fueron cortadas en 2 y 5 cm, se dispusieron manualmente de manera homogénea sobre una superficie plana para formar una capa uniforme. Posteriormente, esta manta o no tejido se pulverizó el 10 % de látex natural, aplicada desde una distancia de 30 cm, el material se dejó secar durante 60 minutos a temperatura ambiente, obteniéndose un peso de 30 g/m², mediante el procedimiento de la Norma ISO 3801:1977 – Textiles – Determinación de la masa por unidad de área (gramaje) y espesor con el equipo especímetro de Lama Norma ISO 2589:2016 - Cuero – Determinación del espesor. 3. A continuación, el no tejido se impregnó con resina acrílica al 70 % y 80 % en peso, asegurando una cobertura uniforme. Las muestras obtenidas se secaron a 90 °C, para favorecer la reticulación de la resina y mejorar la integridad estructural y el acabado superficial, proporcionando un peso de aproximadamente 13 g/cm² en el biocompuesto. El material resultante presentó flexibilidad y cohesión interna comparables a un cuero sintético. Este proceso se explica en la figura 1.



Figura 1. Proceso de elaboración del biocompuesto

Pruebas realizadas según estándares

Las propiedades de resistencia a la tracción y elongación, peso y espesor del biocompuesto se realizó mediante las siguientes normas:

- Norma ISO 1421:2016 Tejidos recubiertos de caucho o plástico: determinación de la resistencia a la tracción y el alargamiento de rotura.
- Norma ISO 3801:1977 – Textiles – Determinación de la masa por unidad de área (gramaje).
- ISO 2589: 2016 IULTCS/IUP 4. Cuero Ensayos físicos y mecánicos - Determinación del espesor.

Las muestras obtenidas fueron previamente acondicionadas en el laboratorio en un ambiente controlado durante 24 horas.⁽³²⁾

Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción y elongación de las muestras se evaluó según el procedimiento de la Norma ISO 1421:2016: Tejidos recubiertos de caucho o plástico: determinación de la resistencia a la tracción y el alargamiento de rotura.⁽³³⁾ Se elaboraron probetas de 250 mm de largo por 50 mm de ancho, según el procedimiento de la norma ISO 1421. Cada muestra se ensayó en el dinamómetro textil Titan 5, empleando las mordazas T27, se aplicó una carga progresiva y una velocidad de tracción de 100 ± 10 mm/min hasta la fractura. Se registraron los valores de la fuerza máxima y la elongación, lo que permitió cuantificar con precisión el comportamiento mecánico (figura 2a).

Determinación de la masa

Norma ISO 3801:1977 – Textiles – Determinación de la masa por unidad de área (gramaje).⁽³⁴⁾ El gramaje del biocompuesto se determinó el valor promedio, en la ecuación 1, según el procedimiento de la norma, que consistió en cortar cinco muestras de las dimensiones de 10 cm x 10 cm, luego se pesaron en la balanza analítica de precisión con sensibilidad de 0,01 g. Esta propiedad permite caracterizar la densidad, (Fig. 2b), para calcular el gramaje se utilizó la fórmula:

Ecuación 1. Gramaje

$$\text{Gramaje} = (\text{Peso de la muestra (g)}) / (\text{Área de la muestra (cm}^2\text{)})$$

Determinación de espesor

ISO 2589: 2016 IULTCS/IUP 4. Cuero Ensayos físicos y mecánicos - Determinación del espesor.⁽³⁵⁾ Para determinar el espesor del biocompuesto según el procedimiento de la norma ISO 2589:2016, se utilizó el medidor de espesor con el especímetro de Lama, aplicando una presión constante y perpendicular sobre el área de contacto. Las mediciones se realizaron en cinco puntos sobre cada muestra. Se registró el valor promedio de 2,5 mm. Esta propiedad es fundamental para evaluar la uniformidad (Figura 2c).

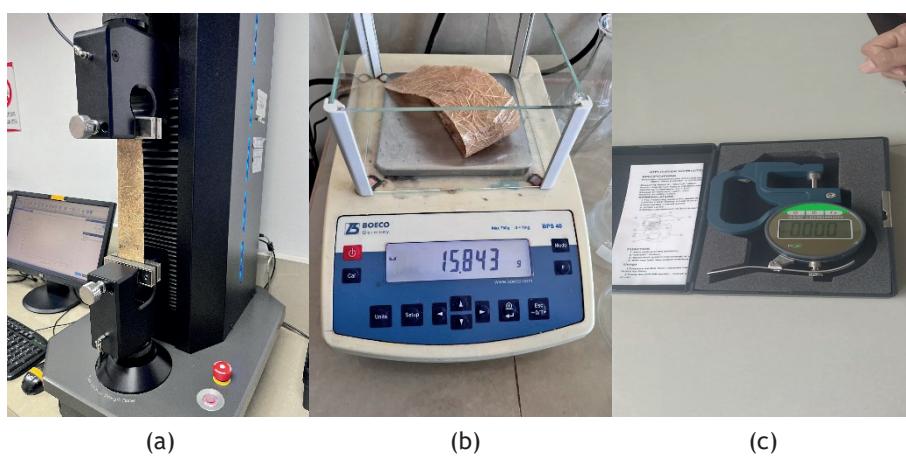


Figura 2. Proceso de ensayos de la caracterización del biocompuesto

RESULTADOS

El diseño experimental 22 empleado consideró dos factores de estudio, resistencia a la tracción distribuidos en cinco bloques. En total se realizaron veinte ensayos para evaluar las variables de respuesta bajo condiciones aleatorizadas. El análisis de varianza contempló doce grados de libertad para el término de error, garantizando una adecuada estimación de la variabilidad experimental y la fiabilidad de los resultados.

El biocompuesto se realizó con fibra de abacá y resina acrílica, y se sometió a ensayos de resistencia a la

tracción y elongación mediante la norma ISO 1421, cuyos resultados se presentan en la tabla 1. En primer lugar, se observó que las muestras con un 70 % de resina acrílica alcanzaron resistencias a la tracción (117,21-121,65 N), las de un 80 % de resina (96,46-122,36 N). La mayor resistencia a la tracción registró 122,36 N, que corresponde a la muestra del Bloque 4 con 80 % de resina y fibras de 5 cm, mientras que la menor resistencia es de 52,19 N, se midió en el Bloque 3 con 80 % de resina acrílica en fibras de 2 cm. La determinación de la masa del biocompuesto mediante el procedimiento de la Norma ISO 3801:1977 proporcionó el valor promedio de 13 g/cm². El valor promedio del espesor según el procedimiento de la norma ISO 2589 es de 2,5 mm.

El análisis del efecto de la longitud de fibra demostró que las fibras de 5 cm prestan una resistencia media aproximada de 107 N, frente a los aproximadamente 64 N obtenidos con fibras de 2 cm. En cambio, en la elongación las fibras de 2 cm proporcionaron datos más elevados de 61,60 mm en el Bloque 2 (80 % de resina), mientras que las de 5 cm registraron valores entre 15,34 mm y 43,85 mm. Los resultados demuestran que la longitud de fibra modifica las propiedades mecánicas y las fibras más largas incrementan la resistencia a la tracción, mientras que las más cortas favorecen una mayor elongación.

La resistencia a la tracción óptima es de 118,308 N con la concentración de resina acrílica al 70 %, con la longitud de fibra de abacá de 5 cm, lo que indica que disminuir el contenido de resina incrementa de manera notable el desempeño mecánico del material. En cambio, el análisis de la elongación presentó el comportamiento óptimo de 50,184 mm con la concentración de 70 % y longitud de fibra de 2 cm.

Tabla 1. Resultados de resistencia a la tracción y elongación

Bloque	Resina Acrílica (%)	Longitud Fibra (cm)	Resistencia Tracción (N)	Elongación (mm)
1	70	5	117,21	25,95
1	70	2	64,03	60,81
1	80	5	102,22	41,18
1	80	2	54,92	39,1
2	70	2	64,57	42,87
2	80	5	106,14	31,82
2	70	5	116,57	32,83
2	80	2	56,68	61,6
3	80	2	52,19	32,74
3	70	5	121,38	36,4
3	80	5	104,18	29,64
3	70	2	60,84	52,47
4	70	2	59,83	42,95
4	80	5	122,36	33,57
4	80	2	63,79	43,85
4	70	5	114,73	32,48
5	80	5	96,46	15,34
5	80	2	64,84	56,75
5	70	5	121,65	34,5
5	70	2	67,9	51,82

Fuente: tomado de Zambrano⁽³⁶⁾

DISCUSIÓN

Análisis de la varianza para la resistencia a la tracción (ANOVA)

Con el objetivo de evaluar el efecto del porcentaje de resina acrílica (A) y la longitud de fibra (B) sobre la resistencia a la tracción y elongación del biocompuesto, se aplicó un análisis de la varianza (ANOVA) bajo un diseño factorial multinivel.

En la tabla 2, se presenta que el ANOVA evidenció que los factores A y B tuvieron un efecto significativo sobre la resistencia a la tracción. De manera significativa, la longitud de fibra (B) mostró un efecto altamente significativo ($F = 322,62$; $p = 0,0000$), indicando que las diferencias observadas entre los niveles de longitud de fibra de 2 cm y 5 cm son estadísticamente relevantes. Estos resultados afirman que los datos experimentales coinciden con lo observado en los resultados experimentales, donde una mayor longitud de fibra mejora la distribución de carga y la resistencia estructural.

De la misma manera, el porcentaje de resina acrílica (A) también presentó un efecto estadísticamente significativo ($F = 8,83$; $p = 0,0117$), lo que sugiere que aumentar la concentración de resina mejora la cohesión del material, aunque con un efecto menos significativo que el de la longitud de la fibra.

Por otro lado, la interacción entre ambos factores (AB) no fue significativa ($F = 1,54$; $p = 0,2388$), lo cual indica que los efectos de cada variable actúan de manera individual sobre la resistencia a la tracción. De igual manera, el efecto de los bloques no fue significativo ($F = 0,54$; $p = 0,7064$), lo que respalda la homogeneidad entre las réplicas experimentales y valida la consistencia del diseño del experimento.

El error total fue relativamente bajo en comparación con la suma de cuadrados explicada por los factores A y B, lo cual refuerza la validez del modelo. Divide la variabilidad de la resistencia a la tracción en componentes específicos para cada uno de los efectos analizados. Despues, evalúa la significancia estadística de estos efectos comparando sus cuadrados medios con una estimación del error experimental. En este análisis, dos efectos presentan un valor P inferior a 0,05, lo que indica que son significativamente distintos de cero con un nivel de confianza del 95 %.

Tabla 2. Análisis de Varianza para la Resistencia a la Tracción

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Resina Acrílica	360 655	1	360 655	8,83	0,0117
B: Longitud Fibra Abacá	13 174,4	1	13 174,4	322,62	0,0000
AB	62,7642	1	62,7642	1,54	0,2388
Bloques	88,9502	4	22,2375	0,54	0,7064
Error total	490,028	12	40,8357		
Total (corr.)	14 176,8	19			

Fuente: tomado de Zambrano⁽³⁶⁾

R-cuadrado = 96,5434 %

R-cuadrado (ajustado por g.l.) = 94,5271 %

Error estándar del est. = 6,39028

Error absoluto medio = 3,6067

Estadístico Durbin-Watson = 2,1959 (P=0,2710)

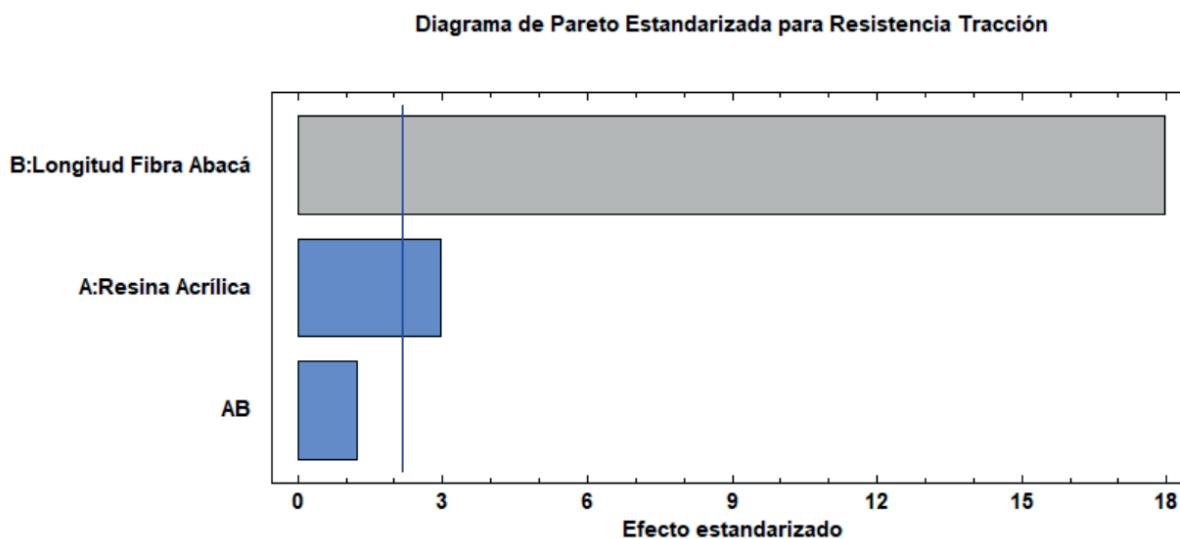
Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,110481

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo, así ajustado, explica 96,5434 % de la variabilidad en Resistencia Tracción. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 94,5271 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 6,39028. El error medio absoluto (MAE) de 3,6067 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %.

El diagrama de Pareto presentado en la figura 3, evaluó el efecto de la resina acrílica, la longitud de fibra de abacá y su interacción sobre la resistencia a la tracción. Los resultados indican que la longitud de la fibra tuvo un impacto positivo altamente significativo, atribuido a una mayor unión y refuerzo estructural en el no tejido. La concentración de resina acrílica también presentó un efecto significativo, aunque negativo, posiblemente por la reducción de flexibilidad del material. La interacción entre ambos factores no resultó significativa, destacando la longitud de fibra como el principal determinante del desempeño mecánico.

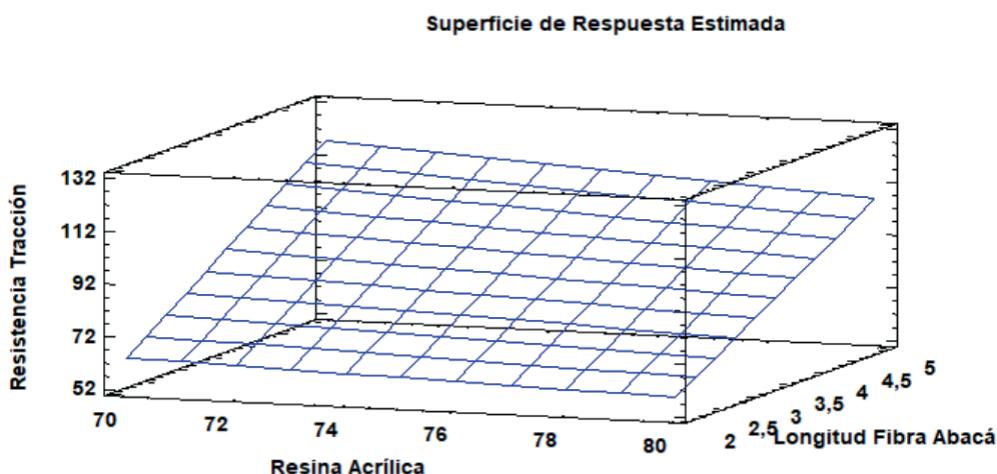
La figura 4, muestra la Superficie de Respuesta Estimada obtenida en el análisis de la resistencia a la tracción en función de dos factores experimentales: la Resina Acrílica y la Longitud de Fibra de Abacá. En el gráfico se representan las interacciones entre estos factores, donde el eje X corresponde a los niveles de resina acrílica, el eje Y a la longitud de la fibra de abacá, y el eje Z a la resistencia a la tracción medida.

La superficie de respuesta estimada revela que la resistencia se incrementa notablemente con el aumento de la longitud de la fibra, mostrando una pendiente ascendente pronunciada en esa dirección. En cambio, el efecto de la resina acrílica es menor, con una pendiente más suave, aunque estadísticamente significativa. La superficie generada es casi plana respecto a la interacción entre ambos factores, lo que confirma su independencia. En conjunto, estos resultados indican que la longitud de la fibra es el principal factor que determina el comportamiento mecánico del material, mientras que la resina actúa como un modificador complementario.



Fuente: tomado de Zambrano⁽³⁶⁾

Figura 3. Diagrama de Pareto estandarizada para la resistencia a la tracción



Fuente: tomado de Zambrano⁽³⁶⁾

Figura 4. Superficie de respuesta estimada para la resistencia a la tracción

Análisis de Varianza para la Elongación (ANOVA)

Con el propósito de analizar el efecto de la concentración de resina acrílica (A) y la longitud de fibra de abacá (B) sobre la elongación del biocompuesto, se aplicó un modelo estadístico ANOVA de dos factores con bloques completamente aleatorizados. La tabla 3 resume los resultados del análisis, permitiendo identificar la influencia estadística de cada variable sobre la capacidad de deformación del material antes de la rotura.

Los resultados del ANOVA muestran que la longitud de la fibra de abacá tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre la elongación ($F = 15,14$; $p = 0,0021$). Este hallazgo coincide con la evidencia experimental, en la cual las muestras con fibras más cortas (2 cm) presentaron mayor capacidad de deformación. Esta tendencia puede atribuirse a una menor rigidez estructural, que facilita el alargamiento del material cuando se somete a esfuerzos mecánicos. En cambio, el efecto de la concentración de resina acrílica no fue significativo ($F = 0,39$; $p = 0,5440$), lo que sugiere que dentro del rango analizado (70 % y 80 %), la resina no influyó en la elongación del material. Esto podría deberse a que el refuerzo principal lo proporciona la estructura fibrosa, mientras que la matriz polimérica actúa más sobre la cohesión y la rigidez que sobre la flexibilidad.

También se observó una interacción significativa entre ambos factores ($F = 0,02$; $p = 0,8891$), lo que indica que sus efectos son independientes. El análisis adicional de los bloques no mostró diferencias significativas ($F = 0,17$; $p = 0,9499$), lo que respalda la homogeneidad del diseño experimental.

Estos resultados permiten concluir que, para optimizar la propiedad de elongación en el biocompuesto a base de fibra de abacá, la longitud de fibra es una variable crítica, mientras que el porcentaje de resina puede ser ajustado sin alterar significativamente la capacidad de deformación del material.

Tabla 3. Análisis de Varianza para la Elongación					
Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Resina Acrílica	37,785	1	37 785	0,39	0,5440
B: Longitud Fibra Abacá	1466,33	1	1466,33	15,14	0,0021
AB	1,96564	1	1,96564	0,02	0,8891
Bloques	65,6488	4	16,4122	0,17	0,9499
Error total	1162,52	12	96,8768		
Total (corr.)	2734,25	19			

Fuente: tomado de Zambrano⁽³⁶⁾

R-cuadrada = 57,483 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 32,6814 %

Error estándar del est. = 9,8426

Error absoluto medio = 6,36245

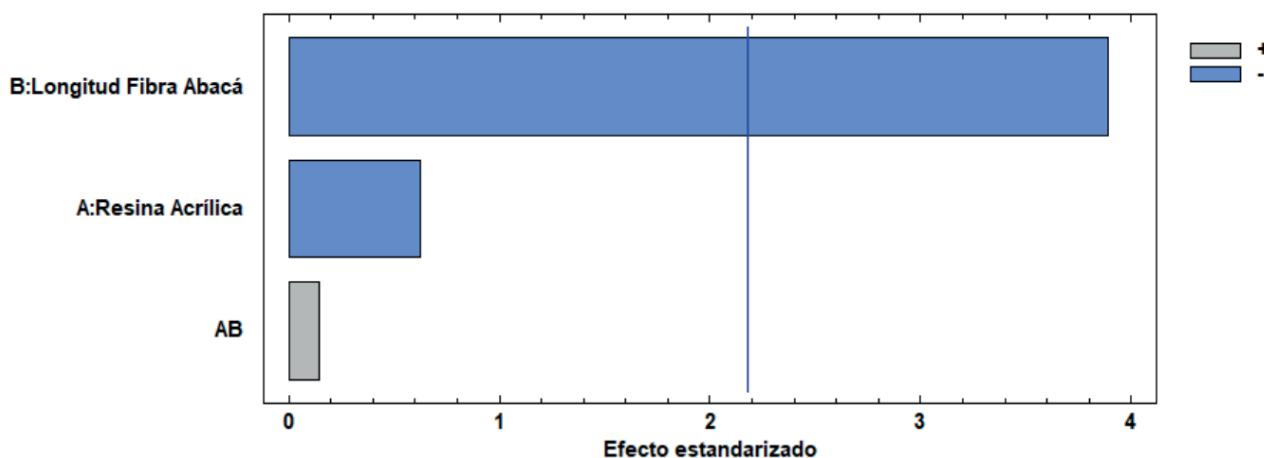
Estadístico Durbin-Watson = 2,65197 (P=0,6991)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,35734

El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo, así ajustado, explica 57,483 % de la variabilidad en Elongación. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 32,6814 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 9,8426. El error medio absoluto (MAE) de 6,36245 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %.

La figura 5 muestra el análisis de efectos estandarizados para la elongación del biocompuesto. Se identificó la longitud de fibra de abacá como el factor más influyente, con un efecto negativo estadísticamente significativo, lo que indica que fibras más largas reducen la elongación del material, posiblemente por un aumento en la rigidez estructural. La concentración de resina acrílica también presentó un efecto negativo, aunque no significativo. La interacción entre ambos factores fue irrelevante. En conjunto, se concluye que la elongación del material está determinada principalmente por la longitud de la fibra.

Diagrama de Pareto Estandarizada para Elongación

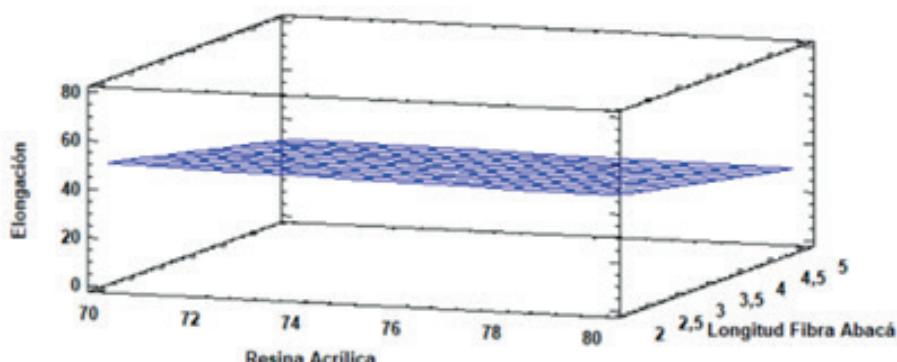


Fuente: tomado de Zambrano⁽³⁶⁾

Figura 5. Diagrama de Pareto estandarizada para la resistencia a la elongación

La figura 6 presenta la superficie de respuesta estimada para la elongación del biocompuesto en función de la longitud de fibra de abacá y la concentración de resina acrílica. La gráfica indica una superficie relativamente plana con una leve disminución en la elongación al aumentar la longitud de la fibra, atribuida a una mayor rigidez estructural. La influencia de la resina acrílica es mínima y no produce variaciones significativas. En conjunto, se confirma que la elongación es poco sensible a la interacción de los factores, siendo la longitud de

la fibra la única con un efecto moderadamente negativo. Estos resultados coinciden con el análisis de efectos estandarizados y refuerzan la idea de que el alargamiento del material está condicionado principalmente por su configuración estructural. A pesar de las variaciones introducidas, la capacidad de deformación del biocompuesto se mantiene dentro de rangos funcionales para aplicaciones textiles.



Fuente: tomado de Zambrano⁽³⁶⁾

Figura 6. Superficie de respuesta estimada para la resistencia a la elongación

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró la viabilidad para la elaboración del biocompuesto a partir de fibra de abacá y resina acrílica, evaluando el efecto de la longitud de fibra de 2 y 5 cm y la concentración de resina acrílica del 70 % y 80 % sobre las propiedades como la resistencia a la tracción y elongación. Los resultados demostraron, que el aumento en la longitud de fibra incrementa significativamente la resistencia a la tracción, mientras que las fibras más cortas ayudan a una mayor elongación, lo que indica un comportamiento más flexible. La formulación de resina acrílica del 70 % y longitud de fibra de 5 cm obtuvo el mejor valor de resistencia a la tracción.

Este biocompuesto presenta un equilibrio funcional entre sostenibilidad, resistencia mecánica y potencial de aplicación en sectores como el diseño, la moda y el calzado. Su elaboración implica el aprovechamiento de recursos naturales renovables, como el abacá, y el uso controlado de polímeros sintéticos, lo cual lo posiciona como una alternativa al cuero animal y al sintético convencional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sumner M. The Independent. 2017. It may not be possible to slow down fast fashion - so can the industry ever be sustainable? <https://www.independent.co.uk/life-style/fashion/it-may-not-be-possible-to-slow-down-fast-fashion-so-can-the-industry-ever-be-sustainable-a7970031.html>
2. Wang H. Advantages of animal leather over alternatives and its medical applications. Eur Polym J. 24 de junio de 2024;214:113153.
3. Choi SM, Lee DH, Zo SM, Sood A, Han SS. Gel-Based Approaches to Vegan Leather: Opportunities and Challenges in Mimicking Leather Properties. Gels. junio de 2025;11(6):395.
4. Ferraris S, Gamna F, Luxbacher T, Maculotti G, Giorio L, Kholkhujaev J, et al. Comparative characterization of leather from different tanning processes as a contribution for a sustainable development of the leather industry. Sci Rep. 27 de marzo de 2025; 15(1):10608.
5. Gilmar H, Olayinka O, Gerda W, Nykieta J, Fauz S, Dayo A, et al. Methods for Quantification of Tannins and Other Polyphenols in *Syzygium cumini* (L.) Bark for Potential Use in Leather Tanning Colouration. Trop J Nat Prod Res. 2 de diciembre de 2024; 8(11). <https://www.tjnpn.org/index.php/home/article/view/5246>
6. Prete P, Accocella S, Intiso A, Cucciniello R. Determination of Cr (VI) released by leather samples using smartphone-based colorimetry for on-site determination and miniaturization as greener preparation strategy. Green Anal Chem. 1 de marzo de 2025;12:100232.
7. Pachnerová Brabcová K, Pravdíková N, Čárová K, Frouzová J, Hebenstreitová K, Jandová K, et al. Effect of leather tanning process on stable isotopes and radiocarbon in tissues of Persian leopard: Preliminary results. Forensic Sci Int Rep. 1 de diciembre de 2024;10:100398.

8. Fan Q, Chen Q, Fan J, Lei Y, Albu-Kaya MG, Tang K. Deterioration of Simulated Waterlogged Leather Tanned with Vegetable Tanning Agents. *J Am Leather Chem Assoc.* 28 de febrero de 2025;120(03):115-24.
9. Hashem MdA, Shahadat MdS, Tabassum JN, Miem MdM, Maoya M. Extraction of tannin from Abrus precatorius seed in leather processing: An eco-friendly approach. *Green Technol Sustain.* 1 de julio de 2025;3(3):100216.
10. Facchin M, Gatto V, Samiolo R, Conca S, Santandrea D, Beghetto V. May 1,3,5-Triazine derivatives be the future of leather tanning? A critical review. *Environ Pollut.* 15 de marzo de 2024;345:123472.
11. Thomasset A, Benayoun S. Assessing the durability of diverse leather tanning techniques for the manufacturing of leather goods through artificial aging processes. *Clean Eng Technol.* 1 de octubre de 2024;22:100807.
12. Conca S, Gatto V, Samiolo R, Giovando S, Cassani A, Tarabra E, et al. Characterisation and tanning effects of purified chestnut and sulfited quebracho extracts. *Collagen Leather.* diciembre de 2024;6(1):28.
13. Shakil SR, Zenith FTJ, Khan MR, Tonay WR. Application and valorization of novel indigenous *Azadirachta indica* leaf in leather processing. *Heliyon.* septiembre de 2024;10(17):e36270.
14. Shakil SR, Zenith FTJ, Khan MR, Tonay WR. Application and valorization of novel indigenous *Azadirachta indica* leaf in leather processing. *Heliyon.* septiembre de 2024;10(17):e36270.
15. Pavani C, Rao PA, Vishnu P, Raja H, Sriram, Sirisha N. Vegan Leather from Agricultural Waste: Exploring Sustainable and Cruelty-Free Alternatives. En: Arya RK, Verros GD, Verma OP, Hussain CM, editores. *From Waste to Wealth.* Singapore: Springer Nature; 2024. p. 951-64. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7552-5_42
16. Rimanho D, Chaerani L, Sundari AS. Initial mechanical properties of orange peel waste as raw material for vegan leather production. *Case Stud Chem Environ Eng.* 1 de diciembre de 2024;10:100786.
17. Maitree N, Naruetharadhol P, Wongsachia S. Encouraging sustainable consumption: Investigating consumer inclination to purchase products made from mango wastes. *Clean Mater.* 1 de marzo de 2024;11:100232.
18. Essalhi F, Essadak A, Bengueddour R. Valorization of trout skins for a circular bioeconomy: Ecological leather production and anaerobic co-digestion of tanning effluents with trout byproducts (Morocco). *Environ Chall.* septiembre de 2025;20:101197.
19. Novia D, Sandra A, Sriagtula R, Rambe H, Busmtoni B, Putra A. Eco-friendly dehairing of goat leather using indigenous rumen microorganisms: Physicochemical and sensory evaluations. *Open Vet J.* 2025;(0):1331.
20. Absharina D, Padri M, Veres C, Vágvölgyi C. Bacterial Cellulose: From Biofabrication to Applications in Sustainable Fashion and Vegan Leather. *Fermentation.* enero de 2025;11(1):23.
21. Nguyen NNY, Nguyen TP, Ta HN, Lu TTM, Pham NY, Le TCG. Bioleather from food waste: Formulation, texture properties and biodegradation capacity. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 1 de marzo de 2025;1465(1):012017.
22. Ihlenfeldt S, Schillberg S, Herrmann C, Vogel S, Arafat R, Harst S. Mycelium-based-composites - Vision for substitution of fossil-based materials. *Procedia CIRP.* 1 de enero de 2024;125:78-83.
23. Amobonye A, Lalung J, Awasthi MK, Pillai S. Fungal mycelium as leather alternative: A sustainable biogenic material for the fashion industry. *Sustain Mater Technol.* 1 de diciembre de 2023;38:e00724.
24. Wijayarathna ERKB, Svensson SE, Sar T, Zamani A. Multilayer biocomposite vegan leather materials derived from vegetable-tanned fungal biomass cultivated on food waste. *Sci Rep.* 2 de mayo de 2025;15(1):15366.
25. Mehta A, Serventi L, Kumar L, Torrico DD. The Scoop on SCOPY (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast): Exploring Consumer Behaviours towards a Novel Ice Cream. *Foods.* enero de 2023;12(17):3152.
26. Vijeandran K, Thanh TAV. Synthesis of Vegan Leather Using Plant-Based Substrates: A Preliminary Study. *Defect Diffus Forum.* 2021;411:57-66.

27. Akhter S, Jahan MS, Rahman MdL, Ruhane TA, Ahmed M, Khan MA. Revolutionizing Sustainable Fashion: Jute-Mycelium Vegan Leather Reinforced with Polyhydroxyalkanoate Biopolymer Crosslinking from Novel Bacteria. *Adv Polym Technol.* 2024;2024(1):1304800.
28. Wemegah R, Addo RAO, Awinzeligo HM, Ibrahim-Dey AM. Integrating E-Waste and Vegetable-Tanned Leather to Produce Fashion Adornments. *Afr J Appl Res.* 25 de diciembre de 2024;10(2):153-72.
29. Hao Y, Wang H, Tian D, Zhang W, Shi B. Scalable production of robust, moisture-wicking, and breathable superfine mycelium fiber/waterborne polyurethane leather-like textile via direct casting and oven-drying. *Ind Crops Prod.* 1 de abril de 2025;226:120632.
30. Katogi H. Effect of Outdoor Exposure on Tensile Property of Synthetic Leather for Personal Mobility. *Procedia Struct Integr.* 1 de enero de 2024;52:611-7.
31. Ryu J, Hao LT, Kim H, Lee S, Jeon H, Hwang DS, et al. Biobased Poly(ester amide)s as Sustainable Coating Materials for Vegan Leather with Improved Haptic Sensation. *ACS Sustain Chem Eng.* 26 de mayo de 2025;13(20):7585-97.
32. UNE-EN ISO 139:2005 Atmósferas normales para acondicionamiento y ensayo (ISO 139:2005). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0034006>
33. ISO. ISO 1421:2016. Tejidos recubiertos de caucho o plástico: determinación de la resistencia a la tracción y el alargamiento de rotura. <https://www.iso.org/standard/65588.html>
34. ISO 3801:1977. Determinación de la masa por unidad de longitud y masa por unidad de área. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/iso?c=009335>
35. ISO. ISO 2589:2016. Cuero – Ensayos físicos y mecánicos – Determinación del espesor. <https://www.iso.org/standard/68859.html>
36. Zambrano A. Evaluación a la resistencia a la tracción y elongación de la imitación del cuero vegetal a partir de un no tejido de fibra de abacá. 2025. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/17488>

FINANCIACIÓN

Ninguna.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Angelo Zambrano, Elsa Sulay Mora Muñoz, Marco Francisco Naranjo Toro.

Curación de datos: Angelo Zambrano, Elsa Sulay Mora Muñoz, Marco Francisco Naranjo Toro.

Ánalisis formal: Angelo Zambrano, Elsa Sulay Mora Muñoz, Marco Francisco Naranjo Toro.

Investigación: Angelo Zambrano.

Metodología: Angelo Zambrano, Elsa Sulay Mora Muñoz, Marco Francisco Naranjo Toro.

Administración del proyecto: Angelo Zambrano.

Recursos: Angelo Zambrano.

Software: Angelo Zambrano.

Supervisión: Angelo Zambrano, Elsa Sulay Mora Muñoz, Marco Francisco Naranjo Toro.

Validación: Angelo Zambrano, Elsa Sulay Mora Muñoz, Marco Francisco Naranjo Toro.

Visualización: Angelo Zambrano, Elsa Sulay Mora Muñoz, Marco Francisco Naranjo Toro.

Redacción - borrador original: Angelo Zambrano.

Redacción - revisión y edición: Angelo Zambrano, Elsa Sulay Mora Muñoz, Marco Francisco Naranjo Toro.