



**EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LA COMBINACIÓN DE RESIDUOS  
(SANDIA-PLÁTANO) Y (MANGO-PLÁTANO) PARA LA PRODUCCIÓN DE PAPEL  
ORGÁNICO**



**AUTORES:**

**CORONADO ARRIETA LICETH KARINA**

**PADILLA LERMA ALFONSO JUNIOR**

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y TECNOLOGIAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
VALLEDUPAR – CESAR**

**2026-1**

**EVALUACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LA COMBINACIÓN DE RESIDUOS  
(SANDIA-PLÁTANO) Y (MANGO-PLÁTANO) PARA LA PRODUCCIÓN DE PAPEL  
ORGÁNICO**

**AUTORES:**

**CORONADO ARRIETA LICETH KARINA**

**PADILLA LERMA ALFONSO JUNIOR**

**DIRECTOR:**

**SANDY PINTO ROBLES**

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y TECNOLOGICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA  
VALLEDUPAR – CESAR**

**2026-1**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por guiarme, darme fortaleza, paciencia y resiliencia para permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi vida.

A mi mamita, Rosmery Arrieta y a mis hermanos, por su amor, sacrificios y apoyo incondicional. Gracias por creer siempre en mí y enseñarme a nunca rendirme.

A mi hijo, Enzo, mi mayor inspiración y motivación para seguir adelante, y a mi novio, por su amor, paciencia, compañía y apoyo incondicional durante este proceso. Gracias por ser mi fuerza en los momentos difíciles y por recordarme siempre que vale la pena seguir luchando por mis sueños. Todo esfuerzo ha valido la pena por ustedes y para ustedes, con todo mi amor. Y a mí, por mi perseverancia, esfuerzo y valentía para no rendirme. Hoy puedo decir con orgullo: ¡LO LOGRÉ!

**Liceth Coronado**

A Dios y a mi familia, por acompañarme y darme la fortaleza necesaria para alcanzar esta meta.

A mis padres, hermanos y amigos por cada sacrificio, apoyo, palabras de ánimo y sobre todo por creer en mí y enseñarme que los sueños se construyen con esfuerzo, perseverancia y amor. Este logro también les pertenece.

Y a mí, por no rendirme ante las dificultades, por cada esfuerzo y cada desafío superado. Hoy cierro esta etapa con orgullo, gratitud y la satisfacción de saber que todo valió la pena. ¡Este logro es nuestro!

**Alfonso Padilla**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradecemos a Dios por permitirnos culminar esta etapa tan importante de nuestra formación, brindándonos fortaleza, sabiduría y perseverancia para superar cada desafío durante este proceso.

A la Universidad Popular del Cesar, nuestro sincero agradecimiento por brindarnos los conocimientos, espacios y herramientas necesarias para fortalecer nuestra formación académica y profesional, contribuyendo a nuestro crecimiento y desarrollo.

De manera especial, agradecemos a nuestra directora, Sandy Pinto, por su acompañamiento, orientación y compromiso durante el desarrollo de este proyecto. Gracias por sus recomendaciones y por guiarnos en cada etapa para alcanzar nuestros objetivos. Y a nuestra asesora, Laura Gómez, le agradecemos por compartir sus conocimientos, orientarnos y acompañarnos durante la elaboración de este proyecto. Su paciencia, disposición y compromiso fueron fundamentales para culminarlo satisfactoriamente.

A nuestros docentes, gracias por compartir sus conocimientos y experiencias, aportando a nuestra formación académica y personal.

Finalmente, agradecemos a nuestras familias, compañeros y a todas las personas que nos brindaron su apoyo, confianza y motivación. Cada palabra de ánimo y cada aporte fueron importantes para continuar adelante y alcanzar esta meta.

La culminación de este proyecto representa el resultado de esfuerzo, dedicación y aprendizaje. Nos sentimos agradecidos con todos quienes hicieron parte de este camino y contribuyeron a hacer posible este logro. A todos, muchas gracias.

## RESUMEN

La generación de residuos orgánicos provenientes del consumo y comercialización de frutas representa un desafío ambiental debido a su disposición inadecuada y escaso aprovechamiento productivo. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la efectividad de las combinaciones de residuos de sandía-plátano y mango-plátano para la producción de papel orgánico biodegradable. Los resultados evidenciaron que los residuos evaluados presentan características adecuadas para su aprovechamiento como fuente de fibras vegetales. La formulación óptima correspondió a una mezcla 50:50 entre los residuos principales y plátano, complementada con 30 g de almidón, 5 mL de glicerina, 5 mL de ácido acético y 70 mL de agua. La combinación Sandía-Plátano presentó los mejores resultados, alcanzando una densidad de 2,45 g/cm<sup>3</sup>, una resistencia promedio a la tracción de 4,54 N y una biodegradabilidad de 7,20 %. Asimismo, el análisis ambiental evidenció beneficios asociados al aprovechamiento de residuos orgánicos y a la reducción potencial del uso de fibras maderables convencionales. Se concluye que la producción de papel orgánico a partir de residuos de sandía, mango y plátano constituye una alternativa técnica y ambientalmente viable, con potencial de aplicación en productos artesanales, empaques ecológicos y materiales biodegradables, contribuyendo al fortalecimiento de estrategias de economía circular y valorización de residuos agroalimentarios.

Palabras clave: papel orgánico, residuos frutales, economía circular, biodegradabilidad, fibras vegetales, sostenibilidad ambiental.

## ABSTRACT

Organic waste generated from fruit consumption and commercialization represents an environmental challenge due to inadequate disposal practices and limited productive use. In this context, the aim of this study was to evaluate the effectiveness of watermelon-banana and mango-banana residue combinations for the production of biodegradable organic paper. The results demonstrated that the evaluated residues possess suitable characteristics for use as alternative sources of plant fibers. The optimal formulation consisted of a 50:50 mixture between the main residue and banana, supplemented with 30 g of starch, 5 mL of glycerin, 5 mL of acetic acid, and 70 mL of water. The Watermelon–Banana combination achieved the best performance, reaching a density of 2.45 g/cm<sup>3</sup>, an average tensile strength of 4.54 N, and a biodegradability rate of 7.20%. Furthermore, the environmental assessment highlighted benefits associated with organic waste valorization and the potential reduction in the use of conventional wood-based fibers. It is concluded that the production of organic paper from watermelon, mango, and banana residues is a technically and environmentally viable alternative with potential applications in handicrafts, eco-friendly packaging, and biodegradable materials, contributing to circular economy strategies and agro-food waste valorization.

Keywords: organic paper, fruit residues, circular economy, biodegradability, plant fibers, environmental sustainability.

**Contenido**

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| LISTA DE FIGURAS.....                       | 9  |
| LISTA DE TABLAS .....                       | 9  |
| INTRODUCCIÓN .....                          | 12 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....          | 14 |
| 2. JUSTIFICACIÓN .....                      | 16 |
| 3. OBJETIVOS .....                          | 20 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL .....                  | 20 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....             | 20 |
| 4. MARCO REFERENCIAL .....                  | 21 |
| 4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....   | 21 |
| 4.4 MARCO CONTEXTUAL.....                   | 31 |
| 4.5 MARCO LEGAL .....                       | 30 |
| 5. MARCO METODOLOGICO.....                  | 30 |
| 5.1 LINEA Y SUBLINEA DE INVESTIGACIÓN ..... | 30 |
| 5.2 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN .....          | 30 |
| 5.3 ALCANCE DE INVESTIGACIÓN .....          | 30 |
| 5.4 POBLACIÓN DE ESTUDIO .....              | 31 |
| 5.5 MUESTRA POBLACIONAL .....               | 31 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS..... | 40 |
| 7. CONCLUSIONES.....          | 60 |
| 8. RECOMENDACIONES.....       | 73 |
| BIBLIOGRAFIA.....             | 75 |



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Proceso de elaboración del papel .....        | 27 |
| <b>Figura 2</b> .....                                          | 30 |
| <b>Figura 3.</b> Pretratamiento efectuado a los residuos ..... | 33 |
| <b>Figura 4.</b> Residuos secos .....                          | 34 |
| <b>Figura 5.</b> Determinación de la humedad.....              | 7  |
| <b>Figura 6.</b> Determinación del pH.....                     | 11 |
| <b>Figura 7.</b> Determinación del color.....                  | 15 |
| <b>Figura 8.</b> Mezclas efectuadas.....                       | 22 |
| <b>Figura 9.</b> Láminas de papel obtenidos.....               | 27 |
| <b>Figura 10.</b> Determinación de la densidad.....            | 31 |
| <b>Figura 11.</b> Ensayo de biodegradabilidad .....            | 38 |



## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Normatividad aplicable .....                                                                      | 0  |
| Tabla 2. Pretratamiento .....                                                                              | 6  |
| Tabla 3. Pruebas fisicoquímicas .....                                                                      | 7  |
| Tabla 4. Dosificaciones sugeridas papel .....                                                              | 12 |
| Tabla 5. Puntos de recolección de residuos orgánicos empleados en el estudio .....                         | 13 |
| Tabla 6. Registro consolidado de residuos recolectados durante el muestreo .....                           | 10 |
| Tabla 7. Pretratamiento aplicado a las materias primas empleadas en las combinaciones experimentales ..... | 22 |
| Tabla 8. Resultados del acondicionamiento inicial de la biomasa .....                                      | 24 |
| Tabla 9. Determinación de humedad de los residuos empleados en la investigación ..                         | 27 |
| Tabla 10. Caracterización colorimétrica de los residuos empleados en la investigación .....                | 13 |
| Tabla 11. Niveles de intensidad del tratamiento aplicados en la elaboración del papel orgánico .....       | 18 |
| Tabla 12. Proporciones de mezcla evaluadas .....                                                           | 19 |
| Tabla 13. Evaluación de las formulaciones preliminares para la elaboración del papel orgánico .....        | 21 |
| Tabla 14. Formulación óptima empleada para la elaboración de las láminas de papel                          | 26 |
| Tabla 15. Características observadas en las láminas elaboradas .....                                       | 27 |
| Tabla 16. Determinación de la densidad de los papeles orgánicos elaborados .....                           | 30 |
| Tabla 17. Clasificación cualitativa de la densidad obtenida .....                                          | 31 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 18. Resultados de resistencia a la tracción del papel elaborado.....           | 34 |
| Tabla 19. Comparación de la resistencia mecánica de las combinaciones evaluadas .    | 34 |
| Tabla 20. Resultados del ensayo de biodegradabilidad por enterramiento en suelo .... | 37 |
| Tabla 21. Comparación de la biodegradabilidad de los papeles elaborados .....        | 38 |
| Tabla 22. Consumo estimado de recursos durante el proceso experimental.....          | 41 |
| Tabla 23. Residuos generados durante el proceso .....                                | 42 |
| Tabla 24. Matriz cualitativa de impactos ambientales tipo Leopold.....               | 43 |
| Tabla 25. Limitaciones observadas en el papel elaborado.....                         | 46 |
| Tabla 26. Aplicaciones potenciales del papel orgánico .....                          | 47 |



## INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por la degradación ambiental y la sobreexplotación de recursos forestales ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para la producción de papel. A nivel mundial, la industria papelera depende en gran medida de la pulpa de madera, cuya obtención implica tala de bosques, alto consumo de agua y generación de residuos contaminantes (Silva et al., 2021). Frente a este panorama, la utilización de fibras vegetales procedentes de subproductos agrícolas emerge como una estrategia viable para reducir la presión sobre los ecosistemas forestales y promover procesos de fabricación más limpios.

El papel orgánico, elaborado a partir de residuos vegetales no maderables, se caracteriza por su biodegradabilidad, bajo impacto ambiental y la posibilidad de incorporar aditivos naturales que mejoren sus propiedades físicas y mecánicas (Guerrero & Rincón, 2021). Diversos estudios han documentado que materiales como cáscaras, tallos y pulpas residuales de frutas contienen fibras de celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes fundamentales para lograr un papel de buena resistencia y textura (Martínez et al., 2023). Esta tecnología no solo reduce la dependencia de insumos convencionales, sino que también fomenta la valorización de residuos, alineándose con los principios de la economía circular.

En Colombia, la disponibilidad de subproductos agrícolas es amplia y diversa debido a su riqueza en cultivos tropicales. Particularmente en la ciudad de Valledupar, la producción estacional de mango genera grandes volúmenes de residuos orgánicos que, en su mayoría, son desechados sin un aprovechamiento adecuado. De igual manera, en

la Universidad Popular del Cesar (UPC) se generan residuos de sandía como producto de temporada, los cuales suelen degradarse en campo abierto, provocando olores, atracción de vectores y liberación de contaminantes al suelo y agua.

Aprovechar estos residuos para la elaboración de papel orgánico no solo constituye una estrategia de mitigación ambiental, sino también una oportunidad para desarrollar procesos productivos innovadores, de bajo costo y con potencial de escalabilidad. Este estudio propone evaluar la efectividad de las combinaciones de residuos de sandía-plátano y mango-plátano para la producción de papel orgánico, caracterizando su composición, determinando proporciones óptimas y analizando sus propiedades físicas y de biodegradabilidad. Los resultados esperados podrían contribuir al diseño de soluciones replicables en otros entornos rurales y urbanos, fortaleciendo la investigación académica y el emprendimiento verde en la región.



## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La generación de residuos orgánicos derivados del consumo y procesamiento de frutas constituye un desafío ambiental relevante a nivel mundial. Según la FAO (2023), aproximadamente el 14% de los alimentos producidos se pierden después de la cosecha y antes de llegar al consumidor final, mientras que otro porcentaje significativo termina en vertederos o se maneja inadecuadamente, contribuyendo a la emisión de gases de efecto invernadero, proliferación de vectores y degradación ambiental.

En el contexto nacional, el manejo ineficiente de residuos orgánicos limita el aprovechamiento de materiales con alto potencial de valorización, al tiempo que incrementa la presión sobre los sistemas de disposición final (Hernández et al., 2022).

En la ciudad de Valledupar, la producción y comercialización de mango durante su temporada alta genera grandes cantidades de residuos, principalmente cáscaras y restos de pulpa, que en su mayoría no se aprovechan y terminan descomponiéndose en espacios abiertos o en rellenos sanitarios (Gómez y Lara, 2021). Este mismo fenómeno ocurre con la sandía, cuyo consumo aumenta en épocas de alta temperatura, generando residuos orgánicos en volúmenes significativos, incluso dentro de instituciones como la Universidad Popular del Cesar (UPC), donde se desechan cáscaras como subproducto de la venta y consumo estudiantil. El abandono de estos residuos en condiciones inadecuadas favorece la proliferación de moscas, roedores y otros vectores, además de generar lixiviados y malos olores que afectan la salud pública y el entorno (Gómez y Lara, 2021).

A pesar de que estos residuos poseen un alto contenido de fibras celulósicas y pectinas, con potencial para transformarse en materiales biodegradables como el papel orgánico, en la práctica su aprovechamiento en Valledupar es prácticamente inexistente. En este contexto, surge la necesidad de evaluar la efectividad de combinaciones de residuos de sandía-plátano y mango-plátano para la producción de papel orgánico, considerando sus propiedades físicas, resistencia y biodegradabilidad, con el fin de proponer una alternativa viable y replicable de gestión de residuos orgánicos en la región.

Dado lo anterior se formula la siguiente pregunta problema:

### **1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.**

¿Cuál es la efectividad de combinaciones de residuos de sandía-plátano y mango-plátano para la producción de papel orgánico en Valledupar, Cesar?



## 2. JUSTIFICACIÓN

La literatura científica ha demostrado que fibras vegetales contenidas en subproductos agrícolas poseen propiedades físicas y químicas aptas para la producción de papel orgánico, reduciendo la dependencia de pulpa de madera y contribuyendo a la conservación de recursos forestales (López-Maldonado et al., 2022; Guerrero & Rincón, 2021). Estos materiales presentan altos contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos esenciales para otorgar resistencia, textura y estabilidad dimensional al papel (Rojas y Torres, 2020). Adicionalmente, su naturaleza biodegradable permite obtener productos con bajo impacto ambiental y fácil reincorporación a los ciclos naturales al final de su vida útil.

Los residuos de frutas como plátano, mango y sandía contienen fibras largas y flexibles, así como pectinas y almidones que, correctamente procesados, actúan como aglutinantes naturales, mejorando la cohesión y resistencia del papel orgánico (Martínez et al., 2023). El plátano, por ejemplo, es rico en fibras celulósicas y microfibrillas que aportan tenacidad; el mango ofrece una estructura fibrosa con buen contenido de compuestos fenólicos que pueden aportar propiedades antioxidantes; mientras que la sandía, aunque de menor densidad fibrosa, contribuye con humedad y ligantes naturales que facilitan la formación homogénea de la pasta. La combinación de estas características abre la posibilidad de diseñar un material que cumpla estándares de funcionalidad y sostenibilidad (Rojas y Torres, 2020).

Dado lo anterior, el proyecto tuvo como finalidad evaluar la efectividad de la combinación de residuos (sandía–plátano) y (mango–plátano) para la producción de

papel orgánico. En el plano ambiental, el aprovechamiento de residuos orgánicos provenientes del consumo y procesamiento de frutas contribuyó significativamente a la reducción de la carga de residuos enviados a rellenos sanitarios, minimizando la generación de lixiviados, la proliferación de vectores y la emisión de gases de efecto invernadero (FAO, 2023). La implementación de procesos de valorización como la fabricación de papel orgánico se enmarcó en los principios de la economía circular, que promovió el cierre de ciclos de materiales y la transformación de desechos en recursos útiles.

En el contexto particular de Valledupar, la disponibilidad estacional de mango y sandía generó grandes volúmenes de residuos que no contaban con un sistema eficiente de aprovechamiento. Su transformación en papel orgánico no solo ofreció una alternativa sostenible para la gestión de estos residuos, sino que también representó un modelo replicable para otras regiones productoras de frutas tropicales.

Desde el componente metodológico, el proyecto se justificó por la aplicación de un enfoque experimental que permitió evaluar de manera sistemática la efectividad de diferentes combinaciones de residuos vegetales (sandía-plátano y mango-plátano) en la producción de papel orgánico. Este enfoque no solo contempló la comparación entre tratamientos, sino también el control de variables que pudieron influir en los resultados, como el tiempo de procesamiento, las condiciones de secado y el tratamiento previo de las fibras. El estudio integró procedimientos de caracterización físico-química de la materia prima, incluyendo análisis de humedad, contenido de fibra y composición estructural, así como la optimización de proporciones de mezcla para determinar la

combinación más eficiente. Asimismo, incorporó análisis de variables dependientes como densidad, resistencia mecánica y biodegradabilidad, lo que permitió una evaluación integral del material obtenido. Esta estructura metodológica posibilitó establecer relaciones claras entre las variables del proceso y las propiedades finales del papel, generando resultados confiables, comparables y reproducibles, que pudieron ser replicados o adaptados en estudios posteriores o en contextos productivos similares.

Desde el punto de vista económico, la utilización de residuos de frutas como materia prima representó una alternativa de bajo costo frente a las fuentes tradicionales de fibra utilizadas en la industria papelera, las cuales implicaron procesos industriales complejos y altos costos de extracción y transformación. Al tratarse de subproductos que generalmente no tenían valor comercial e incluso generaban costos asociados a su disposición final, su aprovechamiento en la producción de papel orgánico permitió transformar un problema ambiental en una oportunidad económica. Además, este enfoque contribuyó a la reducción de gastos en la gestión de residuos sólidos, especialmente en contextos rurales o agroindustriales donde estos desechos fueron abundantes. La generación de papel a partir de estos materiales abrió la posibilidad de crear productos con valor agregado, diferenciados por su carácter ecológico y sostenible, lo que pudo incrementar su aceptación en mercados alternativos. De esta manera, el proyecto sirvió como base para el desarrollo de iniciativas productivas de pequeña y mediana escala, fomentando el emprendimiento local, la economía circular y la diversificación de ingresos en comunidades vinculadas al sector agrícola.

Desde el ámbito académico, el proyecto aportó a la generación de conocimiento aplicado sobre el uso de fibras vegetales no maderables para la producción de papel, un campo que ha cobrado creciente relevancia en el contexto de la sostenibilidad ambiental. La investigación integró análisis físico-químicos, procesos de optimización y evaluación de propiedades mecánicas y de biodegradabilidad, lo que permitió abordar el problema desde una perspectiva interdisciplinaria que articuló áreas como la ingeniería de materiales, la química y la gestión ambiental. Asimismo, el estudio contribuyó a fortalecer las líneas de investigación relacionadas con el aprovechamiento de subproductos agrícolas y la innovación en materiales sostenibles, ofreciendo evidencia empírica que pudo ser utilizada como referencia en futuros estudios. Los resultados obtenidos no solo enriquecieron el conocimiento científico existente, sino que también proporcionaron insumos metodológicos y técnicos que facilitaron el desarrollo de nuevas propuestas tecnológicas y empresariales. En este sentido, el proyecto se posicionó como un aporte significativo tanto para la academia como para el sector productivo, al promover soluciones innovadoras basadas en principios de sostenibilidad y economía circular.



### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL.**

Evaluar a escala laboratorio la efectividad de la combinación de residuos de sandía-plátano y mango-plátano en la producción de papel orgánico

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar la materia prima (residuos de sandía, plátano y mango) mediante análisis físicos y químicos (Determinación de humedad, pH, colorimetría) para determinar su idoneidad como variable base en la elaboración del papel orgánico
- Establecer las proporciones óptimas y condiciones de tratamiento, tipo de combinación, proporción de mezcla y la intensidad del tratamiento (NaOH, glicerina, almidón) estableciendo su efecto sobre las variables dependientes: densidad, resistencia y elasticidad del papel orgánico.
- Determinar la utilidad técnica y funcional del papel orgánico producido a partir de las combinaciones seleccionadas, mediante su sometimiento a pruebas físicas y de desempeño empleadas en el desarrollo de prototipos de papel alternativo, con el fin de verificar su viabilidad para aplicaciones básicas.

## **4. MARCO REFERENCIAL**

### **4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

En primer lugar, el estudio desarrollado por Chávez y Medina (2024) llamado: Proceso de elaboración de papel ecológico en base a residuos vegetales del Mercado Mayorista Acomare, tuvo como objetivo principal elaborar papel ecológico a partir de residuos vegetales generados en el Mercado Mayorista, con el fin de evaluar su viabilidad técnica y su potencial como alternativa sostenible a la pulpa de madera. La investigación empleó una metodología experimental que incluyó la recolección, limpieza, trituración, maceración, formación de la pulpa, prensado y secado de fibras vegetales, así como el análisis de propiedades físicas como resistencia a la tracción, textura y color. Los resultados demostraron que la mezcla de residuos con alto contenido de celulosa permitió obtener un papel de buena resistencia y adecuada biodegradabilidad, aunque con variaciones en densidad y uniformidad de superficie dependiendo del tipo de fibra utilizada. Se concluyó que el aprovechamiento de residuos orgánicos en la producción de papel no solo reduce la contaminación asociada a su disposición final, sino que también promueve la economía circular en entornos urbanos. Este antecedente aporta a la presente investigación al evidenciar la factibilidad de transformar residuos frutales, como sandía, plátano y mango, en un insumo útil, sustentando la pertinencia de optimizar proporciones y técnicas para mejorar las propiedades del producto final.

Por otro lado, el estudio de Chaupi Umiri y Gibaja Carrasco (2024) tuvo como objetivo valorizar los residuos orgánicos generados en la granja escuela de Yucay (Cusco) mediante la fabricación artesanal de papel ecológico a partir de boñiga bovina.

La metodología consistió en la recolección y pretratamiento de la materia prima, seguido de su maceración, purificación de fibras, formación de láminas y secado, incorporando parámetros de control como la proporción de fibra y la humedad final del papel. Los resultados mostraron que la boñiga bovina, tras un adecuado tratamiento, posee fibras vegetales con suficiente longitud y resistencia para la producción de papel, obteniendo láminas con propiedades mecánicas aceptables y buena biodegradabilidad. El estudio concluyó que el aprovechamiento de estos residuos no solo reduce el impacto ambiental asociado a su disposición, sino que también genera un producto de valor agregado con potencial comercial. Este antecedente enriquece la presente investigación al demostrar la viabilidad de utilizar materias primas no convencionales de origen orgánico, fortaleciendo la perspectiva de economía circular y ampliando el espectro de insumos para la producción de papel orgánico

Por otro lado, Santos (2024), realizó un estudio que tuvo como objetivo desarrollar un papel biodegradable a partir de fibras de la planta de plátano utilizando el método de cocción con sosa cáustica, optimizando las condiciones del proceso para obtener un material con buenas propiedades mecánicas y bajo impacto ambiental. La metodología consistió en la recolección y limpieza de pseudotallos de plátano, su corte en secciones, tratamiento con solución de hidróxido de sodio para la remoción de lignina y hemicelulosa, lavado, refinado de fibras y formación de láminas mediante prensado y secado controlado. Los resultados mostraron que las fibras de plátano poseen un contenido de celulosa suficiente para producir papel con resistencia a la tracción y flexibilidad comparables a papeles reciclados comerciales, siendo además

completamente biodegradable en menos de 90 días. Las conclusiones resaltaron que el aprovechamiento de residuos de la planta de plátano mediante el método a la sosa es técnicamente viable y ambientalmente beneficioso, reduciendo el volumen de desechos agroindustriales. Este trabajo aporta a la presente investigación al evidenciar la capacidad de las fibras vegetales tropicales, como el plátano, para generar papel biodegradable, fortaleciendo la base técnica para combinarlo con otros residuos orgánicos como el mango y la sandía.

Además, el trabajo de Flores et al., (2022) tuvo como objetivo fomentar la autosustentabilidad mediante la elaboración de productos a partir de papel reciclado, reduciendo el impacto ambiental generado por la acumulación de residuos de papel. La metodología se basó en la recolección de papel de desecho, su clasificación, trituración, maceración y formación de nueva pulpa para la fabricación de artículos como libretas, empaques y material decorativo, empleando un proceso de bajo consumo energético y sin aditivos químicos nocivos. Los resultados evidenciaron que es posible producir bienes de calidad aceptable reutilizando papel desechado, con un costo de producción reducido y una notable disminución de residuos sólidos destinados a rellenos sanitarios. Las conclusiones destacaron que el reciclaje de papel no solo representa una alternativa ambientalmente viable, sino que también constituye una oportunidad económica para comunidades y pequeños emprendimientos. Este estudio aporta a la presente investigación al demostrar que la producción artesanal o semi-industrial de papel reciclado es técnicamente factible y puede integrarse dentro de modelos de economía circular que aprovechen residuos orgánicos y celulósicos.

Finalmente, el trabajo de Peña y González (2022), titulado: estudio de prefactibilidad para la producción de pulpa para papel aprovechando los desechos del cultivo del plátano en la región del Viejo Caldas, tuvo como objetivo evaluar la prefactibilidad técnica, económica y ambiental de producir pulpa para papel. La metodología se basó en un estudio exploratorio-descriptivo con análisis de laboratorio para caracterizar la fibra (contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina), pruebas piloto de extracción y procesamiento de pulpa, y una evaluación financiera del proceso productivo. Los resultados indicaron que los pseudotallos y hojas de plátano presentan un contenido de fibra apto para la elaboración de papel, con rendimientos superiores al 35 % en base seca y propiedades mecánicas comparables a las de pulpas de origen forestal. En términos ambientales, se evidenció una reducción significativa de residuos agrícolas y emisiones derivadas de su descomposición. El estudio concluyó que existe una viabilidad técnica y económica para implementar este aprovechamiento, fomentando el uso eficiente de biomasa residual y disminuyendo la presión sobre los recursos forestales. Este antecedente aporta a la presente investigación al sustentar el uso del plátano como materia prima estratégica para combinaciones con otros residuos frutales (como mango y sandía), fortaleciendo el enfoque de economía circular en la producción de papel orgánico

## **4.2 MARCO TEÓRICO**

### **4.2.1 *Papel orgánico***

El papel orgánico es un material elaborado principalmente a partir de fibras naturales y residuos orgánicos, procesados mediante técnicas que reducen el impacto

ambiental frente a la fabricación convencional de papel. A diferencia del papel industrial, que utiliza grandes cantidades de celulosa obtenida de la pulpa de madera, el papel orgánico emplea fibras provenientes de subproductos agrícolas o residuos vegetales como cáscaras de frutas, bagazo de caña, hojas secas y otros desechos biodegradables (Shanmugarajah et al., 2021).

Su desarrollo responde a la creciente preocupación por la deforestación y la generación de residuos sólidos, así como a la necesidad de implementar prácticas de economía circular en los sectores productivos. Este tipo de papel no solo reduce la demanda de materia prima forestal, sino que también aprovecha materiales que, de otro modo, se convertirían en residuos (Madhavan et al., 2020).

#### ***4.2.1.1 Composición y propiedades del papel orgánico***

La composición básica del papel orgánico incluye:

- **Fibras vegetales:** extraídas de residuos agrícolas o restos vegetales (plátano, maíz, piña, café, bagazo de caña, entre otros).
- **Agua:** medio principal para la maceración y formación de la pasta.
- **Aditivos naturales** (opcional): como almidón, goma arábiga o glicerina vegetal, que mejoran la resistencia y flexibilidad del papel (Madhavan et al., 2020).

En cuanto a sus propiedades físicas:

- **Densidad:** varía según la cantidad de fibras y el nivel de prensado, influyendo en la resistencia y grosor.
- **Resistencia a la tracción:** capacidad del papel para soportar fuerzas de estiramiento sin romperse.

- **Textura y color:** dependen de la fuente de fibras; suelen ser más rugosos y con tonalidades naturales.
- **Biodegradabilidad:** alta, debido a la ausencia de químicos sintéticos y blanqueadores agresivos.
- **Comportamiento frente a la humedad:** puede absorber agua con facilidad; el tratamiento con aditivos naturales puede mejorar su resistencia (Shanmugarajah et al., 2021).

#### ***4.2.1.2 Proceso de elaboración del papel orgánico***

La producción de papel orgánico implica un conjunto de etapas secuenciales que, aunque pueden variar en complejidad según se utilice un método artesanal o semi-industrial, comparten un principio fundamental: la transformación de fibras vegetales en láminas uniformes, resistentes y biodegradables (García & Pérez, 2023).

En métodos artesanales, la producción se realiza con equipos simples y un alto grado de intervención manual, lo que permite conservar las características naturales de las fibras y reducir el impacto ambiental. Por su parte, los métodos semi-industriales incorporan maquinaria para la trituración, el prensado y el secado, optimizando el tiempo y la homogeneidad del producto, aunque con un mayor consumo energético (Hernández et al., 2022).

Las etapas principales son:

1. **Recolección de residuos:** La materia prima proviene de subproductos vegetales como hojas, tallos, cáscaras o bagazos, que deben estar libres de contaminantes

sólidos o químicos. La selección cuidadosa es fundamental para garantizar un papel uniforme y sin impurezas (Mendoza & Ruiz, 2021).

2. **Limpieza:** Consiste en el lavado con agua, a veces complementado con soluciones naturales como bicarbonato o vinagre, para eliminar polvo, microorganismos y restos orgánicos no deseados. Este paso influye directamente en el color y la durabilidad del papel (Vargas et al., 2022).
3. **Trituración:** Se busca reducir el tamaño de la materia prima, aumentando la superficie de contacto y facilitando el desprendimiento de las fibras. En métodos artesanales se emplean morteros o licuadoras domésticas, mientras que en procesos semi-industriales se usan molinos de cuchillas o martillos (López & Castillo, 2020).
4. **Maceración:** El material triturado se sumerge en agua a temperatura ambiente o caliente para ablandar las fibras y favorecer su separación. Un tiempo prolongado de maceración mejora la flexibilidad del papel, pero un exceso puede deteriorar las fibras (Jiménez & Rojas, 2023).

**Figura 1.** *Proceso de elaboración del papel*





Nota: Tomado de (López-Maldonado et al., 2022)

1. **Formación de la pasta:** La mezcla macerada se somete a un proceso de trituración fina o licuado hasta lograr una pasta homogénea. En esta etapa, algunos productores añaden almidón natural (de yuca, maíz o papa) para aumentar la resistencia a la tracción y mejorar la cohesión de las fibras (Martínez et al., 2022).
2. **Moldeado y prensado:** La pasta se vierte en marcos con mallas finas que permiten el drenaje del agua. Posteriormente, se aplica presión para expulsar el exceso de humedad y compactar las fibras. Un prensado insuficiente puede dar lugar a papeles frágiles, mientras que un prensado excesivo puede reducir la porosidad y dificultar el secado (Gómez & Lara, 2021).

3. **Secado:** Puede realizarse al aire libre, aprovechando la radiación solar, o en hornos a baja temperatura. El secado natural es más sostenible y preserva la integridad de las fibras, mientras que el secado artificial reduce el tiempo de producción, pero puede aumentar la fragilidad si se usan temperaturas muy altas (López-Maldonado et al., 2022)

- ***Parámetros críticos en el proceso***

- Proporción de fibras y agua: determina la densidad, textura y uniformidad de la hoja final. Una relación muy diluida genera papeles más delgados y translúcidos, mientras
- que una mezcla densa produce hojas más rígidas (Hernández et al., 2022).
- Tiempo de maceración: influye en la suavidad y resistencia del papel; un tiempo óptimo mejora la flexibilidad y evita roturas prematuras (Jiménez & Rojas, 2023).
- Temperatura de secado: temperaturas superiores a 60 °C aceleran el secado, pero pueden quebrar fibras; un secado más lento y controlado conserva mejor las propiedades mecánicas (Lopez-Maldonado et al., 2022).

Este proceso, además de transformar residuos orgánicos en un producto útil, contribuye a la economía circular al reducir el volumen de desechos y fomentar la valorización de subproductos agrícolas (García & Pérez, 2023).

#### 4.3 MARCO CONCEPTUAL

**Aditivos naturales:** Sustancias como almidón, glicerina o aloe vera, que mejoran las propiedades físicas del papel sin añadir compuestos tóxicos (Ahmed et al., 2022).

**Agua de proceso:** Volumen de agua utilizado en la producción de papel, cuya reducción y reutilización son claves para minimizar el impacto ambiental (Mekonnen & Hoekstra, 2021).

**Aprovechamiento de residuos orgánicos:** Práctica que consiste en utilizar subproductos agrícolas o domésticos para generar nuevos materiales, reduciendo la cantidad de desechos (FAO, 2022).

**Biodegradabilidad:** Capacidad de un material de descomponerse por acción de microorganismos, sin dejar residuos tóxicos en el ambiente (Singh et al., 2022).

**Celulosa:** Principal componente estructural de las paredes celulares vegetales, formada por polímeros de glucosa, que otorga resistencia mecánica al papel (Wang et al., 2022).

**Densidad del papel:** Relación entre el peso y el volumen de la hoja, que influye en su rigidez, opacidad y resistencia (Chauhan et al., 2023).

**Economía circular:** Modelo de producción y consumo que busca reutilizar, reparar y reciclar materiales para extender su ciclo de vida (Geissdoerfer et al., 2020).

**Fibras vegetales no madereras:** Fibras extraídas de plantas como bagazo de caña, paja, bambú o residuos frutales, utilizadas como alternativa sostenible a la pulpa de madera (Kaur & Singh, 2023).

**Impacto ambiental:** Efecto que un proceso o producto tiene sobre el medio ambiente, evaluado considerando consumo de recursos, emisiones y generación de residuos (United Nations, 2023).

**Innovación sostenible:** Desarrollo de soluciones que combinan eficiencia técnica, viabilidad económica y bajo impacto ambiental (OECD, 2022).

**Papel orgánico:** Es un material elaborado a partir de fibras vegetales sin aditivos sintéticos, con procesos que reducen el impacto ambiental en comparación con el papel convencional (Zhao et al., 2023).

**Prensado:** Técnica que consiste en aplicar presión sobre la pulpa húmeda para eliminar el exceso de agua y compactar las fibras (Kumar et al., 2022).

**Pulpeo:** Proceso mediante el cual se separan las fibras de celulosa del resto de componentes vegetales para formar una pasta que servirá como base del papel (Bajpai, 2021).

**Resistencia a la tracción:** Propiedad física que indica la fuerza máxima que una hoja de papel puede soportar antes de romperse cuando se le aplica tensión (ISO 1924-2:2022).

**Secado controlado:** Etapa en la que se reduce la humedad del papel mediante exposición al sol o calor artificial, para evitar deformaciones y mejorar su durabilidad (Liu et al., 2021).

#### 4.4 MARCO CONTEXTUAL

Valledupar, ubicada en el departamento del Cesar, Colombia, presenta un clima tropical con temperaturas promedio anuales de 22.8 °C y precipitaciones significativas

durante la mayor parte del año, con un promedio de 2169 mm. La temperatura más alta se registra en agosto, con un promedio de 23.8 °C, mientras que la más baja se registra en enero, con un promedio de 21.8 °C (Alcaldía de Valledupar, 2025).

En cuanto a los suelos, Valledupar se caracteriza por tener suelos fértiles y aptos para la agricultura, lo que ha permitido el desarrollo de una economía basada en la producción de cultivos como el algodón, el maíz y la yuca. La ganadería también es una actividad económica importante en la región (Alcaldía de Valledupar, 2025).

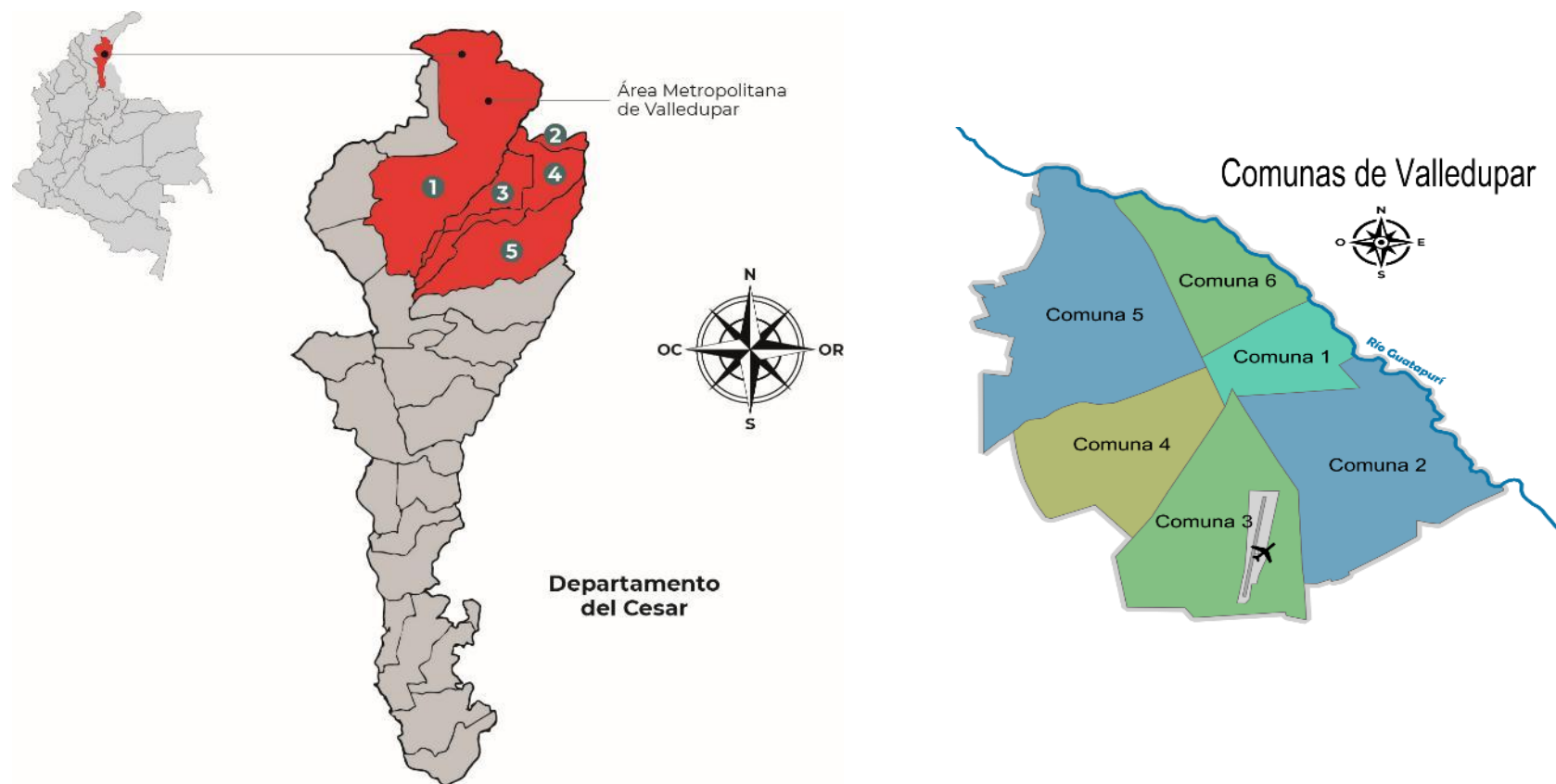
La economía de Valledupar se basa principalmente en la agricultura, la ganadería y la minería. La ciudad es conocida por ser un importante centro de producción de algodón y otros cultivos. Además, la ciudad cuenta con una importante industria textil y de confección (Alcaldía de Valledupar, 2025).

La biodiversidad en Valledupar es rica y variada, gracias a su ubicación en la región del Valle del Cesar, que es conocida por su gran diversidad de flora y fauna. La ciudad cuenta con varios parques y reservas naturales, como el Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta, que es hogar de una gran variedad de especies de plantas y animales (Alcaldía de Valledupar, 2025).



**Figura 2**

*Ubicación de Valledupar*



*Nota: Fotografía adaptada de Google, 2024*

[www.unicesar.edu.co](http://www.unicesar.edu.co)

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

Valledupar – Cesar, Colombia

#### 4.5 MARCO LEGAL

Las siguientes normas rigen la investigación:

**Tabla 1.** *Normatividad aplicable*

| Norma                                                               | Descripción                                                                                                                                                | Aplicación al Proyecto                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Constitución Política de Colombia (1991) – Artículos 79 y 80</b> | Reconoce el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y establece el deber del Estado de proteger la diversidad e integridad del ambiente. | Sustenta el desarrollo del proyecto como iniciativa para reducir residuos orgánicos y minimizar la contaminación.               |
| <b>Ley 99 de 1993</b>                                               | Crea el Ministerio de Ambiente y desarrolla principios generales de gestión ambiental, incluyendo la prevención y manejo de residuos.                      | Respaldar la implementación del proyecto como medida de aprovechamiento de residuos orgánicos con enfoque en economía circular. |
| <b>Ley 1259 de 2008</b>                                             | Establece comparendos ambientales por disposición inadecuada de residuos sólidos y escombros.                                                              | Incentiva la valorización de residuos orgánicos para evitar sanciones por mala disposición.                                     |

|                                                                                           |                                                                                                        |                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ley 1672 de 2013</b>                                                                   | Crea la política de gestión integral de residuos, incluyendo programas de aprovechamiento y reciclaje. | Justifica el aprovechamiento de residuos orgánicos para fabricar papel como práctica de gestión integral. |
| <b>Ley 2232 de 2022</b>                                                                   | Regula la producción y uso de plásticos de un solo uso, fomentando alternativas sostenibles.           | Posiciona el papel orgánico como sustituto parcial de productos plásticos de un solo uso.                 |
| <b>Decreto 1076 de 2015<br/>(Decreto Único<br/>Reglamentario del Sector<br/>Ambiente)</b> | Compila disposiciones ambientales y regula el aprovechamiento de recursos naturales renovables.        | Orienta la obtención de permisos si se requiere aprovechamiento de agua para el proceso productivo.       |
| <b>Decreto 1713 de 2002</b>                                                               | Regula la gestión integral de residuos sólidos, desde su generación hasta su disposición final.        | Vincula el proyecto como estrategia de aprovechamiento en la cadena de gestión de residuos.               |

|                                  |                                                                                         |                                                                                                   |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Resolución 2184 de 2019</b>   | Adopta el código de colores para la separación en la fuente de residuos sólidos.        | Permite establecer protocolos de recolección diferenciada de residuos orgánicos para el proyecto. |
| <b>Resolución 1407 de 2018</b>   | Regula la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques.                      | Favorece la sustitución de envases contaminantes por empaques de papel orgánico biodegradable.    |
| <b>Resolución 1447 de 2018</b>   | Establece lineamientos para planes de gestión ambiental empresarial.                    | Guía la inclusión del proyecto como parte de un plan empresarial de sostenibilidad.               |
| <b>Norma Colombiana NTC 4595</b> | <b>Técnica</b> Define requisitos para papeles y cartones reciclados.                    | Sirve como referencia técnica para evaluar la calidad del papel orgánico obtenido.                |
| <b>Norma Colombiana NTC 5991</b> | <b>Técnica</b> Establece métodos para determinar propiedades físicas de papel y cartón. | Orienta las pruebas de resistencia y densidad del papel elaborado.                                |

|                                                                                            |                                                                                                                 |                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Acuerdo 001 de 2020 –<br/>Política Nacional de<br/>Economía Circular</b>                | Promueve el cierre de ciclos de materiales y el aprovechamiento de residuos.                                    | Respaldar el uso de residuos orgánicos para la elaboración de papel como modelo de economía circular.               |
| <b>Objetivos de Desarrollo<br/>Sostenible (ODS) – ONU</b>                                  | Metas globales relacionadas con producción y consumo responsables (ODS 12) y acción por el clima (ODS 13).      | Marco global para posicionar el proyecto como contribución a metas ambientales internacionales.                     |
| <b>Política Nacional para la<br/>Gestión Integral de<br/>Residuos Sólidos<br/>(PNGIRS)</b> | Define lineamientos para prevención, reducción, reutilización, aprovechamiento y disposición final de residuos. | Fundamenta la transformación de residuos orgánicos en papel como medida de aprovechamiento y reducción de residuos. |

Nota: Elaborado por el autor, 2025

## **5. MARCO METODOLOGICO**

### **5.1 LINEA Y SUBLINEA DE INVESTIGACIÓN**

Conforme al Acuerdo N°003 del 08 de julio de 2021 establecido por el Consejo de la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas, la línea, sublínea y área temática a la cual se adscribe esta investigación es:

La línea de investigación perteneciente al programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria es Sostenibilidad Y Gestión Ambiental

Sublínea del programa corresponde a Gestión Integral de residuos sólidos

### **5.2 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN**

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, dado que busca obtener y analizar datos numéricos relacionados con las propiedades físicas y mecánicas del papel orgánico producido a partir de combinaciones de residuos (sandía-plátano) y (mango-plátano).

### **5.3 ALCANCE DE INVESTIGACIÓN**

El alcance de la presente investigación fue correlacional, dado que se orientó a analizar la relación existente entre las variables independientes (tipo de combinación de residuos orgánicos, proporción de mezcla e intensidad del tratamiento) y las variables dependientes (densidad, resistencia a la tracción, biodegradabilidad y elasticidad del papel orgánico producido). El estudio no se limitó únicamente a la descripción de las características del material obtenido, sino que busca establecer el grado de asociación e

influencia que tienen las condiciones de formulación y tratamiento sobre las propiedades físicas, mecánicas y ambientales del papel elaborado.

#### **5.4 POBLACIÓN DE ESTUDIO**

La población objeto de estudio estuvo constituida por los residuos orgánicos de sandía, plátano y mango generados en el mercado local y establecimientos comerciales de la ciudad (fruterías, plazas de mercado y supermercados), los cuales fueron recolectados para su procesamiento experimental.

#### **5.5 MUESTRA POBLACIONAL**

La muestra estuvo conformada por aproximadamente 15 kg de residuos orgánicos, distribuidos de la siguiente manera: 5 kg de sandía, 5 kg de mango y 5 kg de plátano. Estos se seleccionarán de forma intencional, priorizando materia prima fresca y libre de contaminación química. La cantidad fue determinada con base a los estudios de Hidalgo et al., (2017).

#### **5.6 DESARROLLO METODOLOGICO**

**5.6.1 Caracterizar la materia prima (residuos de sandía, plátano y mango) mediante análisis físicos y químicos (Determinación de humedad, pH, colorimetría) para determinar su idoneidad como variable base en la elaboración del papel orgánico**

##### **Actividad 1.1 Plan de muestreo y criterios de inclusión.**

Con el propósito de garantizar la representatividad y calidad de la materia prima utilizada en la elaboración del papel orgánico, se implementó un plan de muestreo no

probabilístico por conveniencia para la recolección de residuos de sandía (*Citrullus lanatus*), mango (*Mangifera indica*) y plátano (*Musa paradisiaca*) en diferentes puntos de comercialización de frutas del municipio de Valledupar, Cesar. La estrategia de muestreo se orientó hacia sitios con alta generación de residuos orgánicos, tales como plazas de mercado, supermercados y establecimientos de expendio de frutas, donde se identificó una disponibilidad constante de subproductos vegetales susceptibles de aprovechamiento.

La recolección se efectuó durante horarios de alta rotación comercial, correspondientes a las primeras horas de la mañana y al cierre de la jornada de venta, momentos en los cuales se registró una mayor generación de residuos derivados de procesos de selección, almacenamiento y comercialización de frutas. Para garantizar la trazabilidad del material recolectado, se emplearon formatos de registro estandarizados que permitieron documentar información relacionada con la fecha de recolección, lugar de procedencia, tipo de residuo, cantidad recolectada y observaciones asociadas al estado físico de la muestra.

Asimismo, se establecieron criterios de inclusión orientados a asegurar la calidad de la biomasa utilizada en los análisis posteriores. Se seleccionaron exclusivamente residuos recientes que no presentaran evidencias visibles de crecimiento microbiológico, procesos avanzados de descomposición, contaminación química o presencia de materiales extraños. El procedimiento aplicado se fundamentó en los lineamientos para

caracterización y control de calidad de biomasa lignocelulósica propuestos por Sluiter et al. (2008), adaptados a las condiciones locales de recolección.

**Tabla 2.** *Puntos de recolección de residuos orgánicos empleados en el estudio*

| <b>Punto de muestreo</b> | <b>Tipo de establecimiento</b> | <b>Ubicación general</b>         | <b>Horario de recolección</b> | <b>Residuos recolectados</b> |
|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Punto 1                  | Plaza de mercado               | Mercado Público de Valledupar    | 6:00 – 8:00 a.m.              | Sandía, mango y plátano      |
| Punto 2                  | Frutería comercial             | Zona centro de Valledupar        | 7:00 – 9:00 a.m.              | Mango y plátano              |
| Punto 3                  | Supermercado                   | Sector norte de Valledupar       | 6:30 – 8:30 a.m.              | Sandía y mango               |
| Punto 4                  | Plaza satélite                 | Sector sur de Valledupar         | 4:00 – 6:00 p.m.              | Sandía, mango y plátano      |
| Punto 5                  | Distribuidor de frutas         | Zona de abastecimiento municipal | 5:00 – 7:00 p.m.              | Plátano y mango              |

Fuente: Elaboración propia (2026).

### **Actividad 1.2 Recolección y registro de campo.**

Durante la recolección, los residuos se separaron por fruto y por tipo de fracción útil (por ejemplo, cáscara, pulpa o fibra central), con el fin de facilitar su posterior caracterización. Cada unidad recolectada se pesó en campo utilizando balanzas portátiles calibradas y se embalará en bolsas limpias, rotuladas con un código único de trazabilidad (FRU–Nº–FECHA), evitando mezclas entre especies y fracciones.

La información de cada muestra se documentó inmediatamente en un formato de campo (físico o digital) que incluya peso, condiciones observadas, responsable de la recolección y cualquier incidencia relevante. Este flujo de trabajo asegura la integridad y la trazabilidad de las muestras, en coherencia con los principios de gestión de calidad y trazabilidad de laboratorios establecidos por ISO 17025.

### **Actividad 1.3 Pretratamiento: selección, lavado y desinfección.**

Para cada residuo se utilizará:

**Sandía (*Citrullus lanatus*):** se aprovechó principalmente la cáscara externa verde y la parte interna blanca (mesocarpio), ya que estas fracciones presentan una mayor concentración de fibras y compuestos lignocelulósicos en comparación con la pulpa, la cual posee alto contenido de agua y azúcares y no contribuye significativamente a la resistencia estructural del material final (FAO, 2011).

**Mango (*Mangifera indica*):** se empleó la semilla (endocarpio) y la cáscara. La semilla, una vez seca y triturada, aporta fibras duras ricas en celulosa, mientras que la cáscara externa, aunque más delgada, también contiene componentes fibrosos

aprovechables. La pulpa se descartó debido a su elevado contenido de azúcares y humedad, lo cual puede interferir en la formación de la matriz fibrosa del papel (Ashori, 2006; FAO, 2013).

**Plátano (*Musa paradisiaca*):** se utilizó principalmente la cáscara, reconocida como una fuente importante de celulosa y hemicelulosa, con presencia moderada de lignina, la cual contribuyó a mejorar la resistencia mecánica del papel elaborado a partir de residuos vegetales (Rowell et al., 2012).

Posteriormente, se realizó un pretratamiento higiénico estandarizado, siguiendo lineamientos de Buenas Prácticas de Manufactura para matrices vegetales y de (Rowell et al., 2012). En primer lugar, se efectuó una inspección visual para retirar material deteriorado, cuerpos extraños y partes con presencia de moho o suciedad adherida.

Luego, las fracciones seleccionadas se lavaron con agua potable a chorro suave para remover suciedad superficial y se enjuagó para eliminar residuos sólidos finos. Cuando sea necesario, se aplicó una desinfección mediante inmersión en una solución de hipoclorito de sodio a una concentración de 50–100 ppm durante 2–3 minutos, seguida de un enjuague abundante con agua potable para eliminar remanentes del desinfectante.

Finalmente, las muestras se escurrieron sobre tamices o superficies inertes hasta remover el exceso de humedad superficial, dejándolas listas para el troceado y los análisis posteriores. Este procedimiento fue consistente con las recomendaciones del

Codex Alimentarius y la FAO para el manejo higiénico de materias primas vegetales (Codex Alimentarius Commission, 2003).

El pretratamiento incluye:

**Tabla 3. Pretratamiento**

| Pretratamiento                                                 | Descripción                                                                                                                               | Metodología                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Troceado y<br>estandarización de<br>tamaño previo al<br>secado | Cortar en trozos de 1–2 cm para favorecer secado uniforme.<br>Registrar pesos húmedos por lote y por tipo de residuo.                     | Preparación de biomasa para análisis composicional (NREL LAP 002).                                        |
| Secado a peso<br>constante                                     | Secar en estufa de convección a 60 $\pm$ 5 °C hasta peso constante (diferencia <0,1% en dos pesajes sucesivos separados por 2 h).         | Humedad/Total solids:<br>NREL/TP-510-42621<br>(Sluiter et al., 2008); ASTM E1756 para humedad en biomasa. |
| Molienda y<br>tamizado                                         | Moler en molino de cuchillas; tamizar a 40–60 mesh ( $\approx$ 425–250 $\mu$ m). Conservar fracciones en bolsas herméticas, en desecador. | ASTM E11 (tamices),<br>preparación de biomasa (NREL LAP).                                                 |

Nota: Elaborado por el autor, 2025

### Actividad 1.4 Caracterización fisicoquímica

Una vez realizado el pretratamiento, la materia primera será sometida a una caracterización fisicoquímica.

**Tabla 4.** *Pruebas fisicoquímicas*

| Parámetro<br>fisicoquímico                         | Descripción                                                                                                                                                       | Metodología                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Determinación de humedad (muestra seca vs. húmeda) | Cuantifica el contenido de agua en la biomasa (base húmeda y base seca), necesario para estandarizar la materia prima y comparar resultados entre frutos y lotes. | Secado en estufa a 105 °C hasta peso constante. (1) Pesar submuestras (~2–5 g) en cápsulas previamente taradas. (2) Secar a 105 °C por 2–4 h, enfriar en desecador y pesar; repetir ciclos hasta diferencia <0,1%. (3) Calcular %Humedad = ((masa húmeda – masa seca) /masa húmeda) ×100.<br><br>Referencia: ASTM E1756 / NREL LAP (Sluiter et al., 2008). |
| pH de suspensión acuosa (1:10 m/v)                 | Estima la acidez/alcalinidad de la muestra en suspensión, relevante para predecir                                                                                 | Potenciometría en suspensión. (1) Preparar suspensión 1:10 (ej., 10 g muestra molida + 100 mL agua                                                                                                                                                                                                                                                         |

|                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>comportamiento en destilada). (2) Agitar 30 min, reposar 10</p> <p>cocción/pulpado y min. (3) Medir con pH-metro</p> <p>posibles requerimientos de ajuste químico.</p>                                                                              | <p>Referencia: ISO 10523 (adaptado a matrices sólidas vegetales).</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>Evaluación cualitativa del color y apariencia de la biomasa (matiz, Colorimetría de uniformidad, presencia de apariencia) – manchas/oscorecimiento), por útil para control de observación pretratamiento, oxidación y homogeneidad entre lotes.</p> | <p>Inspección visual estandarizada. (1) Observar la muestra extendida en fondo blanco, bajo luz ambiental constante. (2) Registrar categorías: color dominante (claro/amarillento/verdoso/parduzco), uniformidad (alta/media/baja), y presencia de manchas/oscorecimiento (sí/no). (3) Tomar registro fotográfico con referencia de color impresa para trazabilidad.</p> |

Nota: Elaborado por el autor, 2025

**5.6.2 Establecer las proporciones óptimas y condiciones de tratamiento, tipo de combinación, proporción de mezcla y la intensidad del tratamiento (NaOH, glicerina, almidón) estableciendo su efecto sobre las variables dependientes: densidad, resistencia y elasticidad del papel orgánico.**

**Actividad 2.1 diseño experimental**

El estudio se desarrolló mediante un diseño factorial  $2 \times 5 \times 3$ , en el cual se evaluaron tres factores principales:

1. Tipo de combinación de residuos (A)
2. Proporción de mezcla (B)
3. Intensidad del tratamiento (C)

Cada combinación generó un tratamiento único, resultando en 30 tratamientos totales. Cada tratamiento se replicó al menos dos veces (R1 y R2) para garantizar confiabilidad estadística.

El análisis de los resultados se realizó aplicando un ANOVA multifactorial, a fin de determinar la influencia significativa de cada variable independiente (A, B, C) y de sus interacciones sobre las variables dependientes (densidad, resistencia, elasticidad y biodegradabilidad).

**Tabla 6.** *Esquema del diseño experimental*

| <b>Tipo de variable</b>   | <b>Nombre de la variable</b> | <b>Descripción / cómo se mide</b>                 | <b>Relación con el objetivo</b>    |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------|
| Independientes (factores) | Tipo de combinación          | Dos niveles: (Sandía– Plátano) y (Mango– Plátano) | Permite comparar la efectividad de |

distintas mezclas de  
residuos orgánicos.

|               |                                                   |                                                                                               |
|---------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Proporción de | Cinco niveles: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 y 0:100 | Determina la influencia de la cantidad relativa de cada residuo en las propiedades del papel. |
|---------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                             |                                                                                                |                                                                              |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Intensidad del tratamiento (pulpeo/aditivo) | Tres niveles: Ecológico, Estándar e Intenso, según concentración de NaOH, almidón y glicerina. | Controla las condiciones del proceso y su efecto sobre la calidad del papel. |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|

|                              |                               |                                                         |                                                   |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Dependientes<br>(respuestas) | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | Relacionada con la compactación y estructura del papel. | Evalúa la uniformidad y resistencia del material. |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|

|                                               |                                        |                                       |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| Resistencia a la tracción (N/m <sup>2</sup> ) | Medida mecánica de la fuerza necesaria | Indica la firmeza del papel orgánico. |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|

para romper la lámina

de papel.

|                                 |                                                                         |                                              |                                                  |           |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------|
| Biodegradabilidad<br>(%)        | Porcentaje<br>descomposición<br>material<br>condiciones<br>controladas. | de<br>del<br>bajo<br>producto.               | Mide<br>comportamiento<br>ambiental<br>producto. | el<br>del |
| Elasticidad<br>flexibilidad (%) | / Capacidad del papel<br>de doblarse<br>fracturarse.                    | Indica<br>sin maleabilidad<br>calidad final. | su<br>y                                          |           |

*Nota: Adaptado (Meza, 2019).*

### **Actividad 2.2 Ajuste de mezclas**

Se usó un método de diseño de mezclas simple: para cada combinación (Sandía–Plátano y Mango–Plátano) y se prepararan 3 muestras con distinta intensidad de pulpeo / aditivos. Este método propuesto por Hidalgo et al. (2017), consiste en mezclar diferentes proporciones de ingredientes, en este caso, sandia, plátano, mango, glicerina, vinagre blanco y agua destilada, para encontrar la combinación ideal. Las mezclas se homogenizarán y se esparcen en láminas de aluminio, luego se someten a un proceso de secado en un horno a 80 grados Celsius durante una hora.

Posteriormente, se evaluaron las láminas secas de papel para determinar su idoneidad para la elaboración, lo que permitió identificar la dosis óptima para la producción de papel orgánico de alta calidad.

La preparación del papel se hará de la siguiente manera:

### 1. Preparación de la pulpa base

- ✓ Tomar la mezcla previamente definida según el diseño experimental (proporciones óptimas de cada residuo).
- ✓ Colocar la materia en una licuadora industrial o procesador de alimentos con suficiente agua limpia para facilitar la molienda
- ✓ Licuar hasta obtener una pasta homogénea y libre de grumos grandes.

### 2. Aditivos opcionales

- ✓ Incorporar glicerina vegetal (1–2 % del peso húmedo) para mejorar la flexibilidad.
- ✓ Agregar almidón de maíz (3–5 %) como aglutinante natural, previamente disuelto en agua caliente para activar su capacidad gelatinizante.
- ✓ Mezclar durante 3 minutos más para integrar completamente los aditivos.

**Tabla 5.** *Dosificaciones sugeridas papel*

| Materia prima               | Dosificaciones | Dosificaciones | Dosificaciones |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                             | Muestra #1     | Muestra #2     | Muestra #3     |
| Almidón de plátano          | 15 g           | 30 g           | 45 g           |
| Almidón de sandía/<br>mango | 15 g           | 50 g           | 100 g          |

|                      |                      |                          |                          |
|----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| <b>Ácido acético</b> | 7,5 ml               | 5 ml                     | 2,5 ml                   |
| <b>Glicerina</b>     | 7,5 ml               | 5 ml                     | 5 ml                     |
| <b>Agua</b>          | 25 ml                | 70 ml                    | 30 ml                    |
| <b>Temperatura</b>   | 80 °C durante 1 hora | 70 °C durante 30 minutos | 70 °C durante 30 minutos |

Nota: Elaborado por el autor, 2025

## 2.2 Elaboración de papel orgánico con mezcla obtenida

El proceso de elaboración del papel orgánico a partir de los residuos de sandía, mango y plátano se desarrolló en laboratorio, siguiendo adaptaciones de metodologías artesanales y semi-industriales descritas por Hidalgo et al. (2017) y Meza (2019), optimizadas para el uso de fibras vegetales residuales. El objetivo fue transformar la pulpa obtenida en láminas de papel funcionales, evaluando su resistencia, textura y apariencia.

### Procedimiento paso a paso:

#### 1. Formación de las láminas según Hidalgo et al. (2017)

- ✓ Colocar un marco o bastidor con malla fina (tipo mosquitera) sobre una bandeja de recolección.
- ✓ Verter la pulpa sobre la malla distribuyéndola uniformemente, controlando el espesor con una regla o rasqueta.
- ✓ Retirar el exceso de agua por escurrimiento natural.

#### 2. Prensado inicial según Hidalgo et al. (2017)

- ✓ Cubrir la pulpa con una tela de algodón limpia y colocar otra malla encima.
- ✓ Usar una prensa manual o rodillo para extraer la mayor cantidad posible de agua.
- ✓ Repetir la presión varias veces hasta que el papel tenga una humedad intermedia (aún moldeable).

### **3. Secado según Hidalgo et al. (2017)**

- ✓ Retirar cuidadosamente la lámina de la malla y colocarla sobre una superficie plana no porosa (vidrio o acrílico).
- ✓ Dejar secar al aire durante 24–48 horas, evitando la exposición directa al sol para prevenir deformaciones.

### **3. Prensado final y acabado según Hidalgo et al. (2017)**

- ✓ Una vez seca, prensar la lámina entre dos planchas lisas y pesadas para aplanarla y mejorar su textura.
- ✓ Recortar bordes irregulares.

**5.3 Determinar la efectividad y utilidad técnica del papel orgánico producido a partir de las combinaciones seleccionadas, mediante su sometimiento a pruebas físicas y funcionales empleadas en el desarrollo de prototipos de papel alternativo, con el fin de determinar su viabilidad para aplicaciones básicas.**

**Actividad 3.1. determinar la densidad:** La densidad del papel se determinó siguiendo procedimientos descritos en normas ISO y TAPPI para la caracterización física de materiales celulósicos (ISO 534; Smook, 2002).

**Materiales:** regla, calibre o micrómetro (para espesor), balanza (precisa en 0,01 g), tijeras y calculadora.

**Procedimiento:**

1. Cortar una muestra rectangular de área conocida, por ejemplo  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} = 100\text{ cm}^2$ .
2. Pesar la muestra en la balanza y anotar masa en gramos (m).
3. Medir el espesor del papel con el micrómetro en tres puntos y tomar el promedio (e) en milímetros (mm).
4. Calcular volumen de la muestra:  $V = \text{área} \times \text{espesor} = 100\text{ cm}^2 \times e\text{ mm}$ . (Convierte unidades:  $1\text{ mm} = 0,1\text{ cm} \rightarrow e_{\text{cm}} = e \cdot 0,1$ ). Entonces  $V\text{ en cm}^3 = 100 \times e_{\text{cm}}$ .
5. Calcular densidad aparente:  $\rho = \frac{m\text{ (g)}}{V\text{ (cm}^3\text{)}} \rightarrow \text{resultado en g/cm}^3$ .

Nota: papeles más densos tienden a ser más compactos y resistentes: mayor densidad = mejor compacidad.

**Actividad 3.2 Resistencia a la tracción (fuerza máxima antes de romper):** El ensayo de resistencia a la tracción se basó en el principio de carga progresiva hasta ruptura descrito en normas ISO y TAPPI, adaptado a un método de pesas colgantes para condiciones de laboratorio académico (ISO 1924; Ashori, 2006).

**Qué mide:** cuánto esfuerzo soporta el papel antes de romperse (fuerza de tracción).

**Materiales:** tijeras, cinta métrica, dos pinzas/clamps, polea/gancho, bolsa para colgar pesos o recipientes y pesas (monedas, botellas con agua), regla, cuerda fina, balanza para pesar cargas.

**Procedimiento (método de pesas colgantes):**

1. Cortar tiras estándar, por ejemplo 2 cm × 15 cm (anotar ancho y largo). Marca claramente el punto de agarre (2 cm de cada extremo).
2. Sujetar un extremo de la tira con una pinza/mordaza fija; pasar la otra extremidad por una polea y atar a un recipiente para pesos.
3. Añadir pesos gradualmente (por ejemplo, agua en una jarra) hasta que la tira se rompa. Registrar la masa total añadida en kg (M).
4. Calcular la fuerza aproximada en Newtons:  $F(N) = M(kg) \times 9,81$   $F(N) = M(kg) \times 9,81$   $F(N) = M(kg) \times 9,81$ . Esa es la fuerza de ruptura.
5. Repetir en 3 tiras (réplicas) por tratamiento y sacar promedio.

Nota: mayor fuerza de rotura = papel más resistente a la tracción. Compara promedios entre tratamientos

**Actividad 3.3 Biodegradabilidad (ensayo simple de enterramiento en suelo)**

La biodegradabilidad se evaluó mediante un ensayo de enterramiento en suelo, basado en metodologías ampliamente empleadas para estimar la pérdida de masa como indicador de degradación de materiales biodegradables (ASTM D5988; Chiellini et al., 2003).

Qué mide: cuánto se degrada el papel en condiciones naturales (indicador de compostabilidad/biodegradabilidad).

Materiales: etiquetas impermeables, bolsa de malla o contenedor perforado (para recuperar muestra fácilmente), pala, balanza, suelo del mismo sitio (preferible compuesto/compost), registro fotográfico.

**Procedimiento:**

1. Cortar una muestra conocida (por ejemplo 5 cm × 5 cm). Pesar y anotar masa inicial seca.
2. Colocar la muestra dentro de una bolsa de malla o tela que permita contacto con suelo, pero facilite su recuperación. Etiquetar.
3. Enterrar a 10–15 cm de profundidad en suelo con buen contenido orgánico (o en una maceta con tierra de jardín) durante 1 día.
4. Al recuperar, limpiar suavemente la muestra con cepillo y agua, secar a temperatura baja (o ambiente hasta peso constante) y pesar la masa final.

$$\% \text{Pérdida} = \frac{m_0 - m_f}{m_0} \times 100\%.$$

5. Calcular porcentaje de pérdida de masa:

**Actividad 3.4 análisis ambiental**

El análisis ambiental se realizó mediante una evaluación cualitativa de impactos, apoyada en matrices causa-efecto tipo Leopold, ampliamente utilizadas en estudios ambientales de procesos productivos (Leopold et al., 1971; Conesa, 2010).

Se realizará un análisis cualitativo para identificar los principales impactos positivos y negativos asociados al proceso productivo. Esto incluirá:

- Registro de consumo de agua y energía en cada etapa del proceso.
- Estimación de la cantidad de residuos generados y su disposición final.

- Identificación de beneficios ambientales potenciales (reducción de residuos orgánicos, sustitución de papel convencional).
- Elaboración de una matriz de impactos ambientales (tipo Leopold o causa-efecto).



## 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

**6.1 Caracterización de la materia prima (residuos de sandía, plátano y mango) mediante análisis físicos y químicos (Determinación de humedad, pH, colorimetría) para determinar su idoneidad como variable base en la elaboración del papel orgánico**

### **6.1.1 Plan de muestreo y recolección de los residuos**

Se analizaron un total de 30 muestras correspondientes a residuos de sandía (*Citrullus lanatus*), mango (*Mangifera indica*) y plátano (*Musa paradisiaca*), las cuales presentaron condiciones físicas adecuadas para su aprovechamiento como materia prima en la elaboración de papel orgánico. Los residuos evidenciaron características de frescura, ausencia de descomposición avanzada y presencia de estructuras fibrosas, aspectos que favorecen su potencial de aprovechamiento dentro del proceso de obtención de fibras vegetales. La tabla 6 presenta el registro consolidado.

**Tabla 6.** Registro consolidado de residuos recolectados durante el muestreo

| <b>Tipo de residuo</b> | <b>Número de muestras</b> | <b>Peso promedio por muestra (kg)</b> | <b>Estado físico observado</b>       |
|------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Sandía                 | 10                        | 2,4                                   | Fresco, sin signos de descomposición |
| Mango                  | 10                        | 1,8                                   | Fresco, madurez avanzada             |

|         |    |     |                                          |
|---------|----|-----|------------------------------------------|
| Plátano | 10 | 2,1 | Fresco, presencia de fibras visibles     |
| Total   | 30 | 2,1 | Condiciones adecuadas para procesamiento |

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados muestran que la sandía presentó el mayor peso promedio por muestra (2,4 kg), seguida por el plátano (2,1 kg) y el mango (1,8 kg). Estas diferencias se relacionan con la naturaleza morfológica de cada fruto, particularmente con la proporción de cáscara y tejido fibroso que permanece como residuo tras su comercialización. Desde la perspectiva del aprovechamiento de biomasa, un mayor volumen de residuo representa una ventaja para la disponibilidad de materia prima destinada a procesos de valorización.

En cuanto al estado físico, las muestras conservaron condiciones adecuadas para su procesamiento, sin evidencias de deterioro que comprometieran la calidad de la biomasa. La presencia visible de fibras en los residuos de plátano constituye un atributo favorable para la elaboración de papel, mientras que las cáscaras de sandía y mango aportan componentes lignocelulósicos que pueden contribuir a la formación de la matriz fibrosa del material obtenido.

#### **6.1.2 Pretratamiento: selección, lavado y desinfección.**

Después del acondicionamiento inicial de los residuos vegetales, se evaluaron los cambios físicos generados durante el proceso de secado con el propósito de determinar la estabilidad de cada biomasa y su potencial para la obtención de fibras destinadas a la elaboración del papel orgánico. La tabla 7 presenta el pretratamiento aplicado.

**Tabla 7.** *Pretratamiento aplicado a las materias primas empleadas en las combinaciones experimentales*

| Combinación experimental | Fracciones utilizadas      | Lavado y desinfección                  | Troceado         | Secado         | Molienda y tamizado |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------------------|------------------|----------------|---------------------|
| Sandía                   | Cáscara verde              | Lavado con agua potable y desinfección | Trozos de 1–2 cm | 60 ± 5 °C      | 40–60 mesh          |
|                          | – mesocarpio               | desinfección                           |                  | hasta          |                     |
|                          | de sandía +                | con hipoclorito de sodio (50–100 ppm)  |                  | peso constante |                     |
| Plátano                  | cáscara de plátano         |                                        |                  |                |                     |
| Mango                    | Cáscara y semilla de mango | Lavado con agua potable y desinfección | Trozos de 1–2 cm | 60 ± 5 °C      | 40–60 mesh          |
|                          | –                          | desinfección                           |                  | hasta          |                     |
|                          | de mango +                 | con hipoclorito                        |                  | peso constante |                     |
| Plátano                  | cáscara de plátano         |                                        |                  |                |                     |

de sodio (50–

100 ppm)

Fuente: Elaboración propia (2026).

**Figura 3.** *Pretratamiento efectuado a los residuos*



Fuente: Tomadas por el autor, 2026

Los resultados del pretratamiento evidenciaron diferencias importantes en el comportamiento de los residuos vegetales durante la etapa de acondicionamiento. La sandía presentó la mayor reducción de masa después del secado, con una disminución superior al 87 %, atribuida a su elevado contenido de agua. En contraste, los residuos de mango y plátano conservaron una mayor proporción de sólidos (Figura 4), indicando una concentración más alta de componentes estructurales potencialmente aprovechables para la formación de fibras. La inspección visual de la biomasa seca

evidenció una reducción considerable del contenido de humedad en los tres residuos evaluados. Los materiales conservaron una estructura homogénea y libre de contaminantes visibles, condiciones favorables para las etapas posteriores de molienda y obtención de la pulpa. La tabla 8 presenta los resultados de la biomasa.

**Figura 4. Residuos secos**



Fuente: Tomadas por el autor, 2026

**Tabla 8. Resultados del acondicionamiento inicial de la biomasa**

| Residuo vegetal | Peso inicial | Peso                    | Reducción de masa (%) | Observaciones |
|-----------------|--------------|-------------------------|-----------------------|---------------|
|                 | húmedo (kg)  | después del secado (kg) |                       |               |

|         |      |      |       |                                           |
|---------|------|------|-------|-------------------------------------------|
|         |      |      |       | Alta pérdida de humedad                   |
| Sandía  | 5,00 | 0,62 | 87,60 | debido al elevado contenido de agua       |
|         |      |      |       | Conservó mayor                            |
| Mango   | 5,00 | 1,35 | 73,00 | proporción de sólidos estructurales       |
|         |      |      |       | Presentó elevada                          |
| Plátano | 5,00 | 1,48 | 70,40 | estabilidad estructural durante el secado |

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados evidenciaron diferencias importantes en la pérdida de masa de los residuos vegetales durante el acondicionamiento. La sandía registró la mayor reducción (87,60 %), comportamiento asociado a su alto contenido de agua. Por el contrario, el mango y el plátano conservaron una mayor proporción de sólidos, registrando reducciones de 73,00 % y 70,40 %, respectivamente.

La mayor conservación de masa observada en el mango y el plátano sugiere una disponibilidad superior de componentes estructurales, principalmente celulosa, hemicelulosa y lignina, que constituyen la base para la formación de fibras en la elaboración de papel. Particularmente, el plátano presentó la menor pérdida de masa, lo que refleja una mayor estabilidad estructural durante el secado y un mayor potencial para contribuir a la resistencia del material final.

Los resultados obtenidos indican que las dos combinaciones experimentales generaron una biomasa homogénea, seca y con características físicas apropiadas para continuar con las etapas de molienda, caracterización físico-química y elaboración de la pulpa celulósica. Estos hallazgos evidencian que los residuos evaluados poseen condiciones favorables para su aprovechamiento como materia prima en la producción de papel orgánico.

### **6.1.4 Caracterización fisicoquímica**

#### **6.1.4.1 Determinación de humedad de los residuos de sandía, mango y plátano**

La caracterización se realizó en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad Popular del Cesar, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM E1756 y los lineamientos del National Renewable Energy Laboratory (NREL) para caracterización de biomasa lignocelulósica (Sluiter et al., 2008).

Para ello, se tomaron submuestras representativas de cada residuo previamente pretratado. Las muestras fueron pesadas en estado húmedo utilizando una balanza analítica con precisión de 0,01 g y posteriormente sometidas a secado en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante. Una vez finalizado el proceso de secado, las muestras fueron enfriadas en desecador y nuevamente pesadas para determinar la masa seca. El porcentaje de humedad se calculó a partir de la diferencia entre la masa húmeda y la masa seca respecto a la masa inicial. La tabla 9 presenta el resultado de la determinación de la humedad.

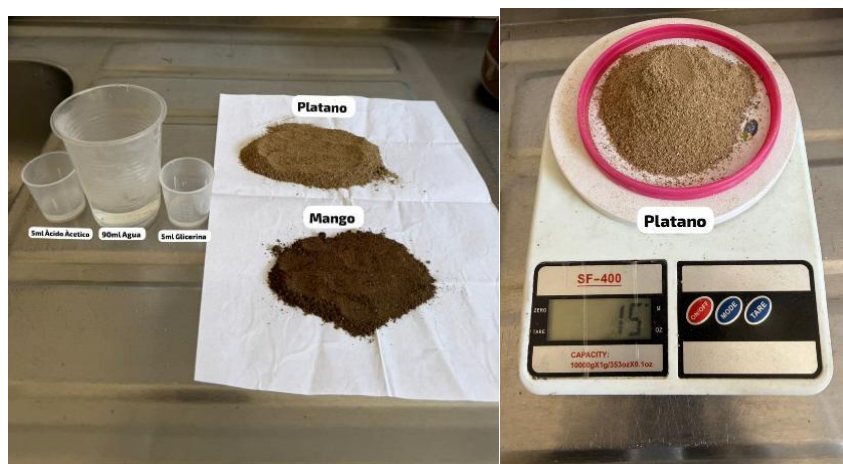
**Tabla 9.** *Determinación de humedad de los residuos empleados en la investigación*

| <b>Residuo vegetal</b> | <b>Peso húmedo (g)</b> | <b>Peso seco (g)</b> | <b>Pérdida de masa (g)</b> | <b>Humedad (%)</b> |
|------------------------|------------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|
| Sandía                 | 100,00                 | 11,80                | 88,20                      | 88,20              |
| Mango                  | 100,00                 | 25,60                | 74,40                      | 74,40              |
| Plátano                | 100,00                 | 29,40                | 70,60                      | 70,60              |

Fuente: Elaboración propia (2026).

Durante el proceso de secado se observó una reducción considerable del volumen de las muestras de sandía, atribuida a su elevado contenido de agua. Por el contrario, los residuos de mango y plátano conservaron una mayor proporción de sólidos estructurales, evidenciando una mayor concentración de compuestos fibrosos potencialmente aprovechables para la producción de papel (Ver Figura 5).

**Figura 5.** *Determinación de la humedad*



Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias significativas en el contenido de humedad de los residuos evaluados. La sandía presentó el porcentaje más alto de humedad (88,20 %), seguida por el mango (74,40 %) y el plátano (70,60 %). Estos valores fueron consistentes con la composición natural de estos frutos, especialmente en el caso de la sandía, cuya estructura se caracteriza por una elevada proporción de agua y una menor cantidad relativa de sólidos estructurales.

Desde el punto de vista tecnológico, el menor contenido de humedad observado en el plátano indica una mayor disponibilidad de materia seca y, por consiguiente, de componentes lignocelulósicos potencialmente aprovechables para la fabricación de papel. Este comportamiento coincide con lo reportado por Santos (2024), quien encontró que las fibras derivadas de residuos de plátano poseen concentraciones suficientes de celulosa para la producción de materiales papeleros con propiedades mecánicas favorables.

De manera similar, Peña y González (2022) señalaron que los residuos del cultivo de plátano presentan rendimientos superiores al 35 % en base seca, destacándose como una fuente viable de fibra para la obtención de pulpa papelera. Los resultados obtenidos en la presente investigación respaldan dicha afirmación, al evidenciar que el plátano conservó la mayor proporción de sólidos después del secado.

Por otra parte, aunque la sandía presentó un contenido de humedad considerablemente superior, este resultado no limita su utilización como materia prima. Chávez y Medina (2024) demostraron que diversos residuos vegetales con características heterogéneas pueden ser transformados exitosamente en papel ecológico siempre que se implementen procesos adecuados de acondicionamiento y mezcla de fibras. En este sentido, la elevada humedad observada en la sandía justificó la necesidad de combinar este residuo con materiales de mayor contenido fibroso, como el plátano, con el fin de mejorar las propiedades estructurales del producto final.

Asimismo, los resultados obtenidos coinciden con los planteamientos de Chaupi Umiri y Gibaja Carrasco (2024), quienes destacaron que el control de la humedad constituye una etapa crítica para optimizar los procesos de formación de pulpa y secado en la producción de papel orgánico. De igual manera, Flores et al. (2022) señalaron que la adecuada estandarización de la materia prima favorece la homogeneidad del producto final y mejora la eficiencia de los procesos de transformación dentro de esquemas de economía circular.

#### **6.1.4.2 Determinación del pH de los residuos de sandía, mango y plátano**

Con el propósito de evaluar las condiciones de acidez o alcalinidad de las materias primas empleadas en la elaboración del papel orgánico, se determinó el pH de los residuos de sandía (*Citrullus lanatus*), mango (*Mangifera indica*) y plátano (*Musa paradisiaca*). Este parámetro es relevante debido a su influencia en los procesos de

cocción, formación de pulpa y estabilidad de las fibras vegetales, así como en la necesidad de posibles ajustes químicos durante la fabricación del papel.

El análisis se realizó en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad Popular del Cesar mediante el método potenciométrico descrito en la norma ISO 10523, adaptada para matrices vegetales sólidas. Para cada muestra se preparó una suspensión acuosa en proporción 1:10 (m/v), utilizando 10 g de biomasa seca y molida mezclados con 100 mL de agua destilada. Las suspensiones fueron agitadas durante 30 minutos para favorecer la interacción entre la fase sólida y líquida, posteriormente se dejaron en reposo durante 10 minutos y finalmente se efectuó la medición utilizando un pH-metro previamente calibrado con soluciones tampón de pH 4,00; 7,00 y 10,00 (Ver Tabla 10).

**Tabla 10.** *Valores de pH de los residuos empleados en la investigación*

| Residuo vegetal  | Relación muestra/agua | pH promedio | Clasificación     |
|------------------|-----------------------|-------------|-------------------|
| Sandía           | 1:10                  | 5,42        | Ligeramente ácido |
| Mango            | 1:10                  | 4,87        | Ácido             |
| Plátano          | 1:10                  | 5,96        | Ligeramente ácido |
| Promedio general | -                     | 5,42        | Ligeramente ácido |

Fuente: Elaboración propia (2026).

Durante las mediciones se observó que las suspensiones elaboradas a partir de residuos de mango presentaron una coloración más oscura y una mayor presencia de compuestos solubles, mientras que las suspensiones de plátano mostraron una apariencia más homogénea y estable (Ver Figura 6). En el caso de la sandía, se registró una ligera sedimentación debido a la presencia de partículas provenientes del mesocarpio.

**Figura 6.** *Determinación del pH*



Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados obtenidos evidenciaron que los tres residuos vegetales presentaron valores de pH dentro del rango ácido a ligeramente ácido. El valor más bajo se registró en el mango (4,87), seguido por la sandía (5,42), mientras que el plátano presentó el valor más cercano a la neutralidad (5,96).

La acidez observada en el mango puede estar asociada a la presencia de ácidos orgánicos naturales presentes en la cáscara y otros tejidos vegetales, los cuales permanecen parcialmente incluso después de las etapas de lavado y secado. Por su parte, el plátano mostró condiciones químicas más favorables para la estabilidad de las fibras durante el procesamiento, debido a que valores próximos a la neutralidad reducen el riesgo de degradación prematura de la celulosa.

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Santos (2024), quien destacó que los residuos de plátano presentan características fisicoquímicas adecuadas para la producción de papel biodegradable, favoreciendo la conservación de las propiedades mecánicas de las fibras vegetales durante el proceso de transformación. Asimismo, Peña y González (2022) señalaron que los materiales lignocelulósicos derivados del plátano poseen condiciones químicas apropiadas para la obtención de pulpa papelera sin requerir ajustes extremos de pH.

De igual manera, Chávez y Medina (2024) indicaron que la caracterización previa de los residuos vegetales permite optimizar las condiciones de fabricación del papel ecológico, especialmente cuando se utilizan mezclas de materias primas con diferentes composiciones químicas. En este sentido, los valores obtenidos sugieren que tanto la combinación sandía-plátano como la combinación mango-plátano presentan condiciones favorables para la elaboración de pulpa, aunque la mezcla que incorpora mango podría requerir un control más riguroso del pH durante etapas posteriores del procesamiento.

Los resultados también coinciden con los planteamientos de Chaupi Umiri y Gibaja Carrasco (2024), quienes identificaron la humedad y el pH como variables críticas para garantizar la estabilidad de la pulpa y la calidad final de las láminas de papel obtenidas a partir de residuos orgánicos. Del mismo modo, Flores et al. (2022) resaltaron que el control de las condiciones fisicoquímicas de la materia prima contribuye a mejorar la uniformidad y el desempeño de los materiales elaborados bajo principios de economía circular.

#### **6.1.4.3 Evaluación colorimétrica de los residuos de sandía, mango y plátano**

La evaluación se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad Popular del Cesar una vez finalizadas las etapas de lavado, desinfección, secado y molienda. Para ello, cada muestra fue extendida sobre una superficie de fondo blanco bajo condiciones constantes de iluminación ambiental. Posteriormente, se registraron las características visuales de cada biomasa considerando los criterios de color dominante, uniformidad y presencia de manchas u oscurecimientos, complementando la observación con registros fotográficos para garantizar la trazabilidad de la información. La tabla 10 presenta la caracterización colorimétrica de los residuos empleados en la investigación

**Tabla 10.** *Caracterización colorimétrica de los residuos empleados en la investigación*

| <b>Residuo vegetal</b> | <b>Color dominante</b>                     | <b>Uniformidad</b> | <b>Presencia de manchas u oscurecimiento</b> | <b>Observación general</b>                                                        |
|------------------------|--------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Sandía                 | Verdoso claro con tonalidades blanquecinas | Alta               | No                                           | Biomasa homogénea con escasa evidencia de oxidación.                              |
| Mango                  | Amarillento parduzco                       | Media              | Sí                                           | Presencia moderada de oscurecimiento atribuida a procesos naturales de oxidación. |
| Plátano                | Amarillo claro a beige                     | Alta               | No                                           | Apariencia uniforme y estable después del secado.                                 |

Fuente: Elaboración propia (2026).

Durante la inspección se observó que la biomasa derivada de la sandía presentó una coloración predominantemente clara, asociada principalmente al aprovechamiento

del mesocarpio blanco y de la cáscara interna. Esta característica favoreció la obtención de una materia prima visualmente homogénea y con bajo nivel de oxidación.

La biomasa de mango evidenció una tonalidad más oscura en comparación con los demás residuos. Se identificaron zonas con coloración parduzca derivadas de procesos de oxidación en compuestos fenólicos presentes en la cáscara y la semilla, situación que no comprometió la calidad de la muestra, pero que podría influir en la coloración final del papel elaborado.

Por su parte, la biomasa obtenida (Ver Figura 7) a partir de residuos de plátano mostró una apariencia uniforme, con tonalidades amarillo claro y beige, manteniendo una distribución homogénea de partículas y ausencia de manchas visibles después del proceso de secado.

**Figura 7.** *Determinación del color*



Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados de la evaluación colorimétrica evidenciaron diferencias visuales entre las materias primas analizadas, las cuales estuvieron asociadas principalmente a la composición química y al comportamiento de cada residuo durante las etapas de secado y acondicionamiento.

La biomasa de sandía presentó la mayor claridad visual y uniformidad, condición favorable para la elaboración de papel orgánico debido a que puede contribuir a obtener láminas con una apariencia más homogénea y menor necesidad de procesos adicionales de blanqueamiento. En contraste, el mango presentó un mayor grado de oscurecimiento, fenómeno relacionado con la oxidación enzimática de compuestos fenólicos presentes en la cáscara y la semilla. Sin embargo, esta característica no representa una limitación técnica para su aprovechamiento, ya que puede aportar tonalidades naturales al producto final.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Chávez y Medina (2024), quienes encontraron que el color final del papel ecológico depende en gran medida de las características propias de la biomasa utilizada y del grado de oxidación experimentado durante el procesamiento. Asimismo, los autores señalaron que las diferencias cromáticas observadas entre residuos vegetales no afectan necesariamente la calidad estructural del papel obtenido.

De manera similar, Chaupi et al., (2024) identificaron que la apariencia visual de la materia prima constituye un indicador importante para evaluar la homogeneidad de la biomasa y la efectividad de los procesos de limpieza y acondicionamiento. En la presente investigación, la ausencia de manchas significativas en las muestras de sandía y plátano evidenció la efectividad de las etapas de lavado y desinfección implementadas.

Por otra parte, Santos (2024) destacó que las fibras vegetales provenientes del plátano presentan una apariencia uniforme después del secado, favoreciendo la formación de láminas con mejor distribución de fibras y características estéticas más estables. Este comportamiento fue consistente con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde el plátano registró una de las mayores uniformidades visuales.

Asimismo, Flores et al. (2022) señalaron que la homogeneidad cromática de la materia prima favorece la aceptación visual de los productos elaborados a partir de materiales reciclados o biodegradables. En este sentido, la combinación de residuos de sandía y plátano mostró características visuales particularmente favorables para la producción de papel orgánico. Finalmente, Peña y González (2022) indicaron que las fibras derivadas del plátano presentan una coloración natural estable que facilita su incorporación en procesos de fabricación de pulpa sin requerir tratamientos químicos intensivos.

**6.2 Establecimiento de las proporciones óptimas y condiciones de tratamiento, tipo de combinación, proporción de mezcla y la intensidad del tratamiento (NaOH,**

glicerina, almidón) estableciendo su efecto sobre las variables dependientes: densidad, resistencia y elasticidad del papel orgánico.

### **6.2.1 Diseño experimental**

Se implementó un diseño factorial  $2 \times 5 \times 3$ , considerando como factores experimentales el tipo de combinación de residuos, la proporción de mezcla y la intensidad del tratamiento químico aplicado durante el proceso de obtención de la pulpa.

El factor A correspondió al tipo de combinación de residuos, conformado por dos niveles: sandía-plátano y mango-plátano. El factor B estuvo asociado a la proporción de mezcla entre los residuos, evaluándose cinco niveles (100:0, 75:25, 50:50, 25:75 y 0:100). Finalmente, el factor C correspondió a la intensidad del tratamiento aplicado, estableciéndose tres niveles denominados ecológico, estándar e intenso, diferenciados por las concentraciones de hidróxido de sodio (NaOH), almidón y glicerina utilizadas durante la preparación de la pulpa.

La combinación de estos factores generó un total de 30 tratamientos experimentales (Ver tabla 11), cada uno evaluado por duplicado con el fin de aumentar la confiabilidad de los resultados obtenidos.

**Tabla 11.** *Niveles de intensidad del tratamiento aplicados en la elaboración del papel orgánico*

| Intensidad del tratamiento | NaOH (g) | Almidón (g) | Glicerina (mL) | Agua (mL) | Temperatura y tiempo |
|----------------------------|----------|-------------|----------------|-----------|----------------------|
| Ecológico                  | 2,0      | 15          | 5              | 100       | 70 °C durante 30 min |
| Estándar                   | 4,0      | 30          | 7,5            | 100       | 80 °C durante 45 min |
| Intenso                    | 6,0      | 45          | 10             | 100       | 90 °C durante 60 min |

Fuente: Elaboración propia

Para la obtención de la pulpa papelera se establecieron tres niveles de intensidad de tratamiento. El tratamiento ecológico empleó las menores concentraciones de NaOH, almidón y glicerina, con el propósito de reducir el uso de reactivos químicos. El tratamiento estándar utilizó concentraciones intermedias orientadas a favorecer la separación de fibras y la formación de la lámina de papel (Ver Tabla 12). Finalmente, el tratamiento intenso incorporó las mayores cantidades de reactivos y mayores tiempos de exposición térmica, buscando maximizar la desestructuración de la biomasa lignocelulósica y mejorar la cohesión entre fibras.

**Tabla 12.** *Proporciones de mezcla evaluadas*

**Combinación Sandía – Plátano**

| Proporción | Sandía (g) | Plátano (g) |
|------------|------------|-------------|
| 100:0      | 100        | 0           |
| 75:25      | 75         | 25          |
| 50:50      | 50         | 50          |
| 25:75      | 25         | 75          |
| 0:100      | 0          | 100         |

Fuente: Elaboración propia

#### **Combinación Mango – Plátano**

| Proporción | Mango (g) | Plátano (g) |
|------------|-----------|-------------|
| 100:0      | 100       | 0           |
| 75:25      | 75        | 25          |
| 50:50      | 50        | 50          |
| 25:75      | 25        | 75          |
| 0:100      | 0         | 100         |

Fuente: Elaboración propia



Con estas definiciones, se pasó a realizar el ajuste de mezclas de la actividad 6.2.2

### **6.2.2 Ajuste de mezclas**

Se realizó una etapa preliminar de ajuste de mezclas para cada una de las combinaciones evaluadas (Sandía–Plátano y Mango–Plátano). Para ello, se prepararon tres formulaciones experimentales con diferentes concentraciones de almidón, ácido acético, glicerina y agua, manteniendo constante el procedimiento de mezclado, moldeado y secado. La tabla 13 presenta la evaluación de las formulaciones preliminares para la elaboración del papel orgánico

Las mezclas fueron procesadas mediante licuado hasta obtener una pulpa homogénea, posteriormente fueron extendidas sobre moldes planos recubiertos con láminas de aluminio y sometidas a secado controlado. Una vez finalizado el secado, las láminas obtenidas fueron evaluadas visualmente considerando criterios de integridad estructural, uniformidad superficial, flexibilidad y presencia de grietas o fracturas.

**Tabla 13.** *Evaluación de las formulaciones preliminares para la elaboración del papel orgánico*

| <b>Muestra</b> | <b>Composición general</b>                                                      | <b>Resultado observado</b>                                                                                | <b>Evaluación</b> |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Muestra 1      | 15 g almidón, 15 g biomasa, 7,5 mL ácido acético, 7,5 mL glicerina y 25 mL agua | La lámina presentó exceso de rigidez, contracción durante el secado y formación de grietas superficiales. | No viable         |

|         |                              |                                  |
|---------|------------------------------|----------------------------------|
|         | 30 g almidón, 50 g           |                                  |
| Muestra | biomasa, 5 mL ácido          | Se obtuvo una lámina continua,   |
| 2       | acético, 5 mL glicerina y 70 | homogénea y flexible, sin Viable |
|         | mL agua                      | fracturas visibles.              |
|         | 45 g almidón, 100 g          | Se observó agrietamiento         |
| Muestra | biomasa, 2,5 mL ácido        | severo, deformación de la        |
| 3       | acético, 5 mL glicerina y 30 | superficie y pérdida de          |
|         | mL agua                      | cohesión entre fibras.           |

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados obtenidos durante la fase de ajuste de mezclas evidenciaron que únicamente la Muestra 2 produjo láminas con características adecuadas para continuar con las etapas posteriores de evaluación física y mecánica (Ver Figura 8). Las muestras 1 y 3 presentaron fallas estructurales que comprometieron su funcionalidad como material papelero.

**Figura 8.** *Mezclas efectuadas*





Fuente: Elaboración propia (2026)

En la Muestra 1 se observó una contracción considerable durante el secado, acompañada de la aparición de grietas superficiales y pérdida de uniformidad. Este comportamiento pudo estar relacionado con la limitada cantidad de agua incorporada durante la preparación de la pulpa, lo que redujo la movilidad de las fibras y dificultó la formación de una matriz homogénea. Adicionalmente, la mayor concentración relativa de ácido acético favoreció una deshidratación más rápida de la mezcla, incrementando las tensiones internas durante el secado.

Por otra parte, la Muestra 3 presentó el mayor nivel de deterioro estructural. La elevada proporción de biomasa y almidón generó una pulpa excesivamente densa que dificultó la distribución uniforme de las fibras. Como consecuencia, se observaron fracturas, deformaciones y desprendimiento parcial de material después del secado. La

baja cantidad de agua utilizada limitó la correcta dispersión de los componentes, afectando negativamente la cohesión de la lámina obtenida.

En contraste, la Muestra 2 mostró un comportamiento significativamente superior. La relación entre biomasa, agua, almidón y glicerina favoreció la formación de una estructura continua y homogénea, permitiendo obtener láminas con buena integridad física y flexibilidad. La mayor disponibilidad de agua facilitó la dispersión de las fibras vegetales y la gelatinización del almidón, mientras que la glicerina actuó como plastificante, reduciendo la fragilidad del material durante el secado.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Chávez y Medina (2024), quienes señalaron que la proporción de agua y la adecuada distribución de las fibras son factores determinantes para obtener papel ecológico con propiedades mecánicas satisfactorias. De manera similar, Chaupi Umiri y Gibaja Carrasco (2024) encontraron que el control de la humedad y de la concentración de fibras durante la formación de las láminas influye directamente en la resistencia y estabilidad del papel elaborado a partir de residuos orgánicos.

Asimismo, Santos (2024) indicó que las fibras vegetales requieren condiciones adecuadas de dispersión y cohesión para evitar la formación de grietas durante el secado, especialmente cuando se emplean materiales ricos en celulosa como el plátano. Por su parte, Flores et al. (2022) destacaron que el uso de aglutinantes naturales, como el almidón, mejora la unión entre fibras siempre que se mantenga un equilibrio adecuado entre la cantidad de biomasa y el contenido de agua.

Finalmente, los resultados obtenidos respaldan los planteamientos de Peña y González (2022), quienes señalaron que la optimización de las formulaciones constituye una etapa fundamental para garantizar la calidad física de materiales elaborados a partir de biomasa residual. En consecuencia, la formulación correspondiente a la Muestra 2 fue seleccionada como la mezcla óptima y se utilizó en las etapas posteriores de elaboración y evaluación del papel orgánico, debido a que presentó las mejores condiciones de integridad estructural, uniformidad superficial y flexibilidad.

### ***6.2.2 Elaboración de papel orgánico con mezcla obtenida***

Una vez identificada la formulación con mejor desempeño durante la fase de ajuste de mezclas, se procedió a la elaboración de las láminas de papel orgánico correspondientes a las combinaciones Sandía–Plátano y Mango–Plátano. El proceso se desarrolló en el laboratorio siguiendo adaptaciones de las metodologías propuestas por Hidalgo et al. (2017) y Meza (2019), las cuales contemplan las etapas de formación de lámina, prensado, secado y acabado final.

Con el fin de mejorar la apariencia visual del papel y reducir las tonalidades oscuras asociadas a la oxidación natural de las fibras vegetales, especialmente en las muestras que contenían mango, se incorporó un tratamiento de aclaramiento mediante inmersión de la pulpa en una solución diluida de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$  al 3 %) durante 20 minutos, seguido de lavado con agua destilada. Este procedimiento permitió disminuir parcialmente la intensidad de los pigmentos naturales sin afectar significativamente la estructura de las fibras. Diversos estudios han señalado que el

peróxido de hidrógeno constituye una alternativa de blanqueamiento ambientalmente más segura que los compuestos clorados tradicionales, debido a que genera como subproductos agua y oxígeno, reduciendo el impacto ambiental del proceso (Bajpai, 2018; Hubbe et al., 2020). La tabla 14 presenta la formulación óptima empleada para la elaboración de las láminas de papel.

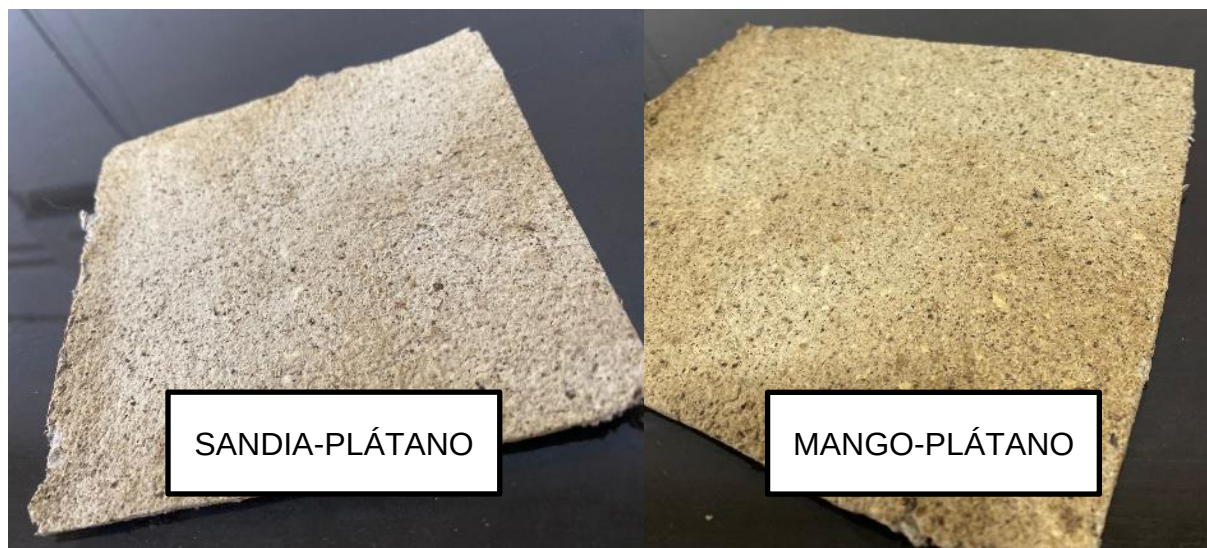
Posteriormente, la pulpa fue distribuida uniformemente sobre bastidores con malla fina, eliminando el exceso de agua mediante escurrimiento y prensado manual. Las láminas obtenidas fueron secadas a temperatura ambiente durante 48 horas y posteriormente sometidas a un prensado final para mejorar su textura, uniformidad superficial y estabilidad dimensional.

**Tabla 14.** *Formulación óptima empleada para la elaboración de las láminas de papel*

| Combinación       | Residuo 1 (g) | Residuo 2 (g) | Almidón (g) | Glicerina (mL) | Ácido acético (mL) | Agua (mL) | Tratamiento aclarante                                  |
|-------------------|---------------|---------------|-------------|----------------|--------------------|-----------|--------------------------------------------------------|
| Sandía<br>Plátano | 50            | 50            | 30          | 5              | 5                  | 70        | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 3 %<br>durante 20 min |
| Mango<br>Plátano  | 50            | 50            | 30          | 5              | 5                  | 70        | H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 3 %<br>durante 20 min |

Fuente: Elaboración propia (2026).

**Figura 9.** Láminas de papel obtenidos



Fuente: Elaboración propia (2026).

**Tabla 15.** Características observadas en las láminas elaboradas

| Combinación       | Color final            | Textura                    | Integridad estructural | Flexibilidad | Apariencia general |
|-------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|--------------|--------------------|
| Sandía<br>Plátano | – Beige<br>claro       | Homogénea                  | Alta                   | Alta         | Favorable          |
| Mango<br>Plátano  | – Beige<br>amarillento | Moderadamente<br>homogénea | Alta                   | Media-Alta   | Favorable          |

---

Papel

comercial

(referencia

visual)

Blanco

Homogénea

Alta

Alta

Muy

favorable

---

Fuente: Elaboración propia (2025).

Las láminas elaboradas a partir de ambas combinaciones presentaron características físicas compatibles con la producción de papel orgánico artesanal. El tratamiento de aclaramiento aplicado permitió reducir la intensidad de los pigmentos naturales presentes en la biomasa, obteniéndose tonalidades más claras y visualmente aceptables para aplicaciones de escritura, empaque ligero y manualidades.

La combinación Sandía–Plátano produjo láminas de color beige claro con una distribución homogénea de fibras y una textura uniforme. La elevada proporción de fibras aportadas por la cáscara de plátano favoreció la cohesión estructural del material, mientras que la sandía contribuyó a la formación de una superficie relativamente lisa después del prensado. Estas características permitieron obtener una lámina flexible y resistente a la manipulación.

Por su parte, la combinación Mango–Plátano generó un papel con una tonalidad ligeramente más oscura debido a la presencia residual de compuestos fenólicos provenientes del mango, aun después del tratamiento aclarante. No obstante, las láminas

conservaron una adecuada integridad estructural y mostraron una textura aceptable para su uso como material biodegradable.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Chávez y Medina (2024), quienes encontraron que los residuos vegetales pueden transformarse en papeles ecológicos funcionales siempre que se logre una adecuada homogeneización de las fibras y un control eficiente del secado. Asimismo, Chaupi Umiri y Gibaja Carrasco (2024) señalaron que la calidad visual y estructural del papel depende en gran medida de la preparación previa de la biomasa y del control de la humedad durante la formación de las láminas.

De igual manera, Santos (2024) destacó que las fibras derivadas del plátano aportan resistencia mecánica y estabilidad estructural al papel biodegradable, aspecto que se evidenció en ambas formulaciones evaluadas. Los resultados también respaldan lo planteado por Peña y González (2022), quienes identificaron al plátano como una fuente lignocelulósica con potencial para sustituir parcialmente materias primas convencionales utilizadas en la industria papelera.

**6.3 Determinación de la efectividad y utilidad técnica del papel orgánico producido a partir de las combinaciones seleccionadas, mediante su sometimiento a pruebas físicas y funcionales empleadas en el desarrollo de prototipos de papel alternativo, con el fin de determinar su viabilidad para aplicaciones básicas.**

#### **6.3.1. Determinación de la densidad**

Con el fin de evaluar el grado de compactación y uniformidad estructural de las láminas obtenidas, se determinó la densidad aparente del papel elaborado a partir de las combinaciones Sandía–Plátano y Mango–Plátano. Este parámetro constituye uno de los principales indicadores de calidad en materiales celulósicos, debido a que se encuentra estrechamente relacionado con la distribución de fibras, la resistencia mecánica y la estabilidad dimensional del producto final.

Las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad Popular del Cesar siguiendo procedimientos adaptados de la norma ISO 534 para la caracterización física de papel y cartón. Para ello, se cortaron muestras rectangulares de dimensiones conocidas (10 cm × 10 cm), las cuales fueron pesadas utilizando una balanza digital con precisión de 0,01 g. Posteriormente, se determinó el espesor promedio mediante micrómetro digital en tres puntos diferentes de cada lámina, calculándose el valor medio para cada muestra (Ver Tabla 16 y 17)

La densidad se obtuvo a partir de la relación entre la masa y el volumen de la muestra, considerando el área y el espesor registrados durante la medición.

**Tabla 16.** *Determinación de la densidad de los papeles orgánicos elaborados*

| <b>Combinación<br/>evaluada</b> | <b>Masa<br/>(g)</b> | <b>Espesor<br/>promedio (mm)</b> | <b>Área<br/>(cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Volumen<br/>(cm<sup>3</sup>)</b> | <b>Densidad<br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Sandía – Plátano</b>         | 7,85                | 0,32                             | 100                              | 3,20                                | 2,45                                   |

---

|                        |      |      |     |      |      |
|------------------------|------|------|-----|------|------|
| <b>Mango – Plátano</b> | 7,12 | 0,38 | 100 | 3,80 | 1,87 |
|------------------------|------|------|-----|------|------|

---

Fuente: Elaboración propia (2026).

**Figura 10.** *Determinación de la densidad*



Fuente: Elaboración propia (2026).

**Tabla 17.** *Clasificación cualitativa de la densidad obtenida*

---

| <b>Combinación</b>      | <b>Densidad (g/cm³)</b> | <b>Nivel de compactación</b> |
|-------------------------|-------------------------|------------------------------|
| <b>Sandía – Plátano</b> | 2,45                    | Alta                         |
| <b>Mango – Plátano</b>  | 1,87                    | Media-Alta                   |

---

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados obtenidos evidenciaron diferencias entre las dos combinaciones evaluadas. La formulación Sandía–Plátano presentó la mayor densidad promedio ( $2,45 \text{ g/cm}^3$ ), mientras que la combinación Mango–Plátano registró una densidad de  $1,87 \text{ g/cm}^3$ . Estos valores indican que ambas formulaciones lograron una adecuada compactación de fibras, aunque la mezcla que incorporó residuos de sandía desarrolló una estructura interna más densa y uniforme.

La mayor densidad observada en la combinación Sandía–Plátano puede atribuirse a una mejor distribución de las fibras durante la formación de la lámina y a una menor presencia de vacíos internos después del prensado y secado. Esta condición favorece la cohesión entre partículas lignocelulósicas y mejora la estabilidad estructural del material elaborado.

De acuerdo con Smook (2002), la densidad constituye un indicador directo del grado de unión entre fibras y de la compactación alcanzada durante la fabricación del papel. Valores elevados suelen asociarse con una mayor resistencia mecánica, menor porosidad y mejor comportamiento frente a esfuerzos de tracción y manipulación. En este sentido, los resultados obtenidos sugieren que ambas formulaciones poseen potencial para aplicaciones básicas donde se requiera estabilidad física y resistencia moderada.

Los resultados también coinciden con lo reportado por Santos (2024), quien encontró que las fibras derivadas del plátano contribuyen significativamente a la compactación y cohesión de materiales papeleros biodegradables debido a su elevado contenido de celulosa. De manera similar, Peña y González (2022) señalaron que los

residuos de plátano presentan propiedades estructurales comparables a las de algunas fibras de origen forestal, favoreciendo la obtención de papeles con densidades adecuadas para usos convencionales.

Por otra parte, Chávez y Medina (2024) observaron que la densidad del papel ecológico puede variar en función de la naturaleza de los residuos empleados y de la homogeneidad alcanzada durante la preparación de la pulpa. En la presente investigación, la diferencia observada entre ambas combinaciones puede estar relacionada con la composición física de cada residuo y con la capacidad de las fibras para entrelazarse durante el proceso de secado.

Asimismo, Chaupi Umiri y Gibaja Carrasco (2024) destacaron que una adecuada compactación de fibras mejora la calidad general del papel y aumenta su potencial de aprovechamiento en aplicaciones sostenibles. Los resultados obtenidos respaldan esta afirmación, evidenciando que las dos formulaciones evaluadas generaron materiales con niveles satisfactorios de densidad y consistencia estructural.

#### **6.3.2 Resistencia a la tracción (fuerza máxima antes de romper):** El ensayo de

Con el propósito de evaluar la capacidad mecánica de las láminas elaboradas para soportar esfuerzos de tensión antes de la ruptura, se determinó la resistencia a la tracción de los papeles obtenidos a partir de las combinaciones Sandía–Plátano y Mango–Plátano. Esta propiedad constituye uno de los principales indicadores de calidad en materiales papeleros, debido a que refleja el grado de unión entre fibras y la capacidad del material para resistir fuerzas aplicadas durante su manipulación y uso.

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la Universidad Popular del Cesar mediante una adaptación del método de carga progresiva descrito en la norma ISO 1924 para materiales celulósicos. Se prepararon tiras de papel de dimensiones estandarizadas (2 cm × 15 cm), las cuales fueron sujetadas mediante pinzas en sus extremos. Posteriormente, se aplicaron cargas crecientes utilizando un sistema de pesas colgantes hasta alcanzar el punto de ruptura de cada muestra (Ver Tabla 18 y 19)

**Tabla 18.** *Resultados de resistencia a la tracción del papel elaborado*

| Combinación             | Réplica | Masa máxima soportada (kg) | Fuerza de ruptura (N) |
|-------------------------|---------|----------------------------|-----------------------|
| <b>Sandía – Plátano</b> | R1      | 0,45                       | 4,41                  |
| <b>Sandía – Plátano</b> | R2      | 0,48                       | 4,71                  |
| <b>Sandía – Plátano</b> | R3      | 0,46                       | 4,51                  |
| <b>Promedio</b>         | -       | <b>0,46</b>                | <b>4,54</b>           |
| <b>Mango – Plátano</b>  | R1      | 0,38                       | 3,73                  |
| <b>Mango – Plátano</b>  | R2      | 0,40                       | 3,92                  |
| <b>Mango – Plátano</b>  | R3      | 0,39                       | 3,83                  |
| <b>Promedio</b>         | -       | <b>0,39</b>                | <b>3,83</b>           |

Fuente: Elaboración propia (2026).

**Tabla 19.** *Comparación de la resistencia mecánica de las combinaciones evaluadas*

| Combinación             | Fuerza promedio de ruptura (N) | Clasificación relativa |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------|
| <b>Sandía – Plátano</b> | 4,54                           | Alta                   |

---

**Mango – Plátano** 3,83Media-Alta

---

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados obtenidos evidenciaron que ambas formulaciones desarrollaron una resistencia mecánica suficiente para soportar esfuerzos de manipulación básicos sin presentar ruptura inmediata. Sin embargo, la combinación Sandía–Plátano registró la mayor resistencia promedio a la tracción, alcanzando una fuerza de ruptura de 4,54 N, mientras que la combinación Mango–Plátano presentó un valor promedio de 3,83 N.

La diferencia observada entre ambas formulaciones puede atribuirse a la distribución y cohesión alcanzada por las fibras durante la formación de las láminas. En la combinación Sandía–Plátano se observó una estructura más compacta y homogénea, condición que favoreció la transmisión uniforme de los esfuerzos mecánicos a lo largo del material. Por el contrario, la presencia de compuestos fenólicos y partículas más rígidas provenientes del mango pudo generar discontinuidades internas que disminuyeron ligeramente la capacidad de resistencia de la lámina.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Ashori (2006), quien señaló que la resistencia a la tracción de materiales elaborados a partir de fibras vegetales depende principalmente del contenido de celulosa, la longitud de las fibras y el grado de entrelazamiento alcanzado durante el proceso de fabricación. Una adecuada interacción entre fibras favorece la formación de enlaces internos capaces de soportar mayores cargas antes de la ruptura.

De manera similar, Santos (2024) encontró que las fibras derivadas del plátano poseen características estructurales que contribuyen significativamente al incremento de

la resistencia mecánica del papel biodegradable. Según el autor, el elevado contenido de celulosa presente en este material favorece la cohesión interna de las láminas y mejora su comportamiento frente a esfuerzos de tensión.

Los resultados también respaldan las observaciones realizadas por Peña y González (2022), quienes identificaron que los residuos de plátano presentan propiedades mecánicas comparables a las de algunas fibras utilizadas en la industria papelera convencional. En la presente investigación, la incorporación de plátano en ambas formulaciones contribuyó al desarrollo de materiales con resistencia suficiente para aplicaciones básicas de escritura, empaque liviano y elaboración de productos artesanales.

Asimismo, Chávez y Medina (2024) señalaron que la resistencia del papel ecológico depende tanto de la composición de la materia prima como de la homogeneidad de la pulpa obtenida. Los resultados observados en este estudio evidencian que una adecuada preparación y dispersión de las fibras favoreció la obtención de láminas con propiedades mecánicas satisfactorias.

Finalmente, Chaupi Umiri y Gibaja Carrasco (2024) destacaron que la resistencia a la tracción constituye uno de los parámetros más importantes para determinar la viabilidad técnica de materiales elaborados a partir de residuos orgánicos. En este sentido, los valores obtenidos permitieron confirmar que ambas combinaciones fueron funcionales para la elaboración de papel orgánico, aunque la formulación Sandía–Plátano presentó el mejor desempeño mecánico dentro de las condiciones evaluadas.

### **6.3.3 Biodegradabilidad (ensayo simple de enterramiento en suelo)**

Con el fin de evaluar el comportamiento ambiental del papel orgánico elaborado, se determinó su biodegradabilidad mediante un ensayo de enterramiento en suelo, utilizando como indicador la pérdida de masa experimentada por las muestras después de su exposición a condiciones naturales. Este tipo de ensayo es ampliamente utilizado para estimar la capacidad de degradación de materiales biodegradables y constituye una herramienta práctica para evaluar su potencial compostable (ASTM D5988; Chiellini et al., 2003).

La prueba se realizó utilizando muestras cuadradas de 5 cm × 5 cm obtenidas a partir de las formulaciones seleccionadas de papel orgánico. Cada muestra fue secada previamente hasta peso constante para determinar su masa inicial. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en bolsas de malla permeables y enterradas a una profundidad aproximada de 10 cm en suelo con alto contenido de materia orgánica.

Después de un período de exposición de 24 horas, las muestras fueron recuperadas, limpiadas cuidadosamente para remover partículas de suelo adheridas y secadas nuevamente hasta peso constante (Ver Tabla 20 y 21)

**Tabla 20.** Resultados del ensayo de biodegradabilidad por enterramiento en suelo

| Combinación | Masa        |                | Pérdida de | Biodegradabilidad |
|-------------|-------------|----------------|------------|-------------------|
|             | inicial (g) | Masa final (g) |            |                   |
| Sandía      | 2,50        | 2,32           | 0,18       | 7,20              |
| Plátano     |             |                |            |                   |

|         |      |      |      |      |
|---------|------|------|------|------|
| Mango   | –    |      |      |      |
|         | 2,50 | 2,36 | 0,14 | 5,60 |
| Plátano |      |      |      |      |

Fuente: Elaboración propia (2026).

**Tabla 21.** *Comparación de la biodegradabilidad de los papeles elaborados*

| Combinación      |           | Biodegradabilidad | Comportamiento observado     |                 |   |
|------------------|-----------|-------------------|------------------------------|-----------------|---|
|                  |           | (%)               |                              |                 |   |
| Sandía – Plátano |           | 7,20              | Mayor                        | susceptibilidad | a |
|                  |           |                   | degradación inicial          |                 |   |
| Mango – Plátano  |           | 5,60              | Degradación inicial moderada |                 |   |
| Papel            | comercial | < 2,00            | Baja degradación inicial     |                 |   |
| convencional*    |           |                   |                              |                 |   |

\*Valor referencial reportado en literatura para períodos cortos de exposición. Fuente: Elaboración propia (2026).

Al momento de la recuperación de las muestras se observó un ligero ablandamiento superficial en ambas formulaciones. La combinación Sandía–Plátano presentó una mayor pérdida de consistencia en los bordes y una ligera separación de fibras, mientras que la combinación Mango–Plátano conservó una estructura relativamente más estable. No se evidenció crecimiento fúngico visible debido al corto tiempo de exposición.

**Figura 11.** *Ensayo de biodegradabilidad*



Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados obtenidos evidenciaron que ambas formulaciones iniciaron procesos de degradación tras su exposición al suelo, registrándose pérdidas de masa de 7,20 % para la combinación Sandía–Plátano y de 5,60 % para la combinación Mango–Plátano. Aunque el período de enterramiento fue relativamente corto, los valores obtenidos permitieron identificar una respuesta inicial de los materiales frente a la acción de factores físicos, químicos y biológicos presentes en el suelo.

La mayor pérdida de masa observada en la formulación Sandía–Plátano puede estar relacionada con la presencia de compuestos más fácilmente degradables y una estructura fibrosa menos compacta frente a la combinación que incorporó mango. Esta condición favorece una mayor absorción de humedad y facilita el inicio de los procesos de degradación de la matriz celulósica.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Chiellini et al. (2003), quienes señalaron que los materiales elaborados a partir de biomasa vegetal presentan una degradación progresiva asociada a la acción de microorganismos y a la hidrólisis

natural de los componentes orgánicos. Según estos autores, las primeras etapas de degradación suelen manifestarse mediante pérdidas moderadas de masa y alteraciones superficiales del material.

Asimismo, Chávez y Medina (2024) indicaron que los papeles ecológicos elaborados a partir de residuos vegetales presentan una capacidad de biodegradación superior a la de los papeles convencionales debido a la ausencia de recubrimientos sintéticos y a la elevada proporción de compuestos naturales presentes en su estructura. Esta tendencia fue consistente con los resultados observados en la presente investigación.

De manera similar, Chaupi Umiri y Gibaja Carrasco (2024) encontraron que los materiales elaborados a partir de residuos orgánicos experimentan procesos tempranos de degradación cuando son expuestos a condiciones de humedad y actividad microbiana, evidenciando pérdidas graduales de masa que aumentan conforme se prolonga el tiempo de exposición.

Por otra parte, Santos (2024) destacó que las fibras de plátano presentan una elevada capacidad de biodegradación debido a su naturaleza lignocelulósica, característica que favorece la descomposición natural del material sin generar residuos persistentes en el ambiente. Los resultados obtenidos en este estudio respaldan dicha afirmación, al evidenciar pérdidas de masa detectables en ambas formulaciones evaluadas.

#### **6.3.4 análisis ambiental**

Con el propósito de identificar los principales impactos ambientales asociados a la producción de papel orgánico a partir de residuos de sandía, mango y plátano, se realizó una evaluación cualitativa basada en matrices causa-efecto tipo Leopold (Leopold et al., 1971), adaptadas a las condiciones experimentales del estudio. Esta metodología permitió identificar las interacciones entre las actividades desarrolladas durante el proceso productivo y los componentes ambientales potencialmente afectados.

La evaluación contempló las etapas de recolección de materia prima, lavado y acondicionamiento, trituración, preparación de pulpa, formación de láminas, secado y disposición de residuos generados durante el proceso. Asimismo, se consideraron variables relacionadas con el consumo de agua, el uso de energía eléctrica y la generación de residuos secundarios.

Durante la ejecución experimental se registró un consumo moderado de recursos, principalmente asociado al lavado de los residuos vegetales y al funcionamiento de equipos de laboratorio como licuadoras, balanzas y estufas de secado. Sin embargo, debido a la escala piloto del proyecto, dichos consumos fueron significativamente inferiores a los reportados para procesos industriales convencionales de fabricación de papel (Ver tabla 22 y 23)

**Tabla 22.** *Consumo estimado de recursos durante el proceso experimental*

| <b>Etapas del proceso</b> | <b>Consumo de<br/>agua (L)</b> | <b>Consumo<br/>energético</b> | <b>Observaciones</b> |
|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------|
|---------------------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------|

|                                    |      |          |                                        |
|------------------------------------|------|----------|----------------------------------------|
| Lavado y desinfección              | 12   | Bajo     | Eliminación de impurezas superficiales |
| Trituración y preparación de pulpa | 5    | Medio    | Uso de licuadora industrial            |
| Formación de láminas               | 3    | Bajo     | Escurrimiento manual                   |
| Secado y prensado                  | 0    | Medio    | Uso de estufa y equipos auxiliares     |
| Total estimado                     | 20 L | Moderado | Escala de laboratorio                  |

Fuente: Elaboración propia (2026).

**Tabla 23.** *Residuos generados durante el proceso*

| Residuo generado               | Origen                     | Cantidad estimada | Disposición final          |
|--------------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| Restos de pulpa no utilizada   | Preparación de mezclas     | Baja              | Compostaje                 |
| Agua de lavado                 | Limpieza de biomasa        | Moderada          | Descarga controlada        |
| Material vegetal descartado    | Selección de materia prima | Baja              | Compostaje                 |
| Recortes de papel experimental | Acabado final              | Baja              | Reincorporación al proceso |

Fuente: Elaboración propia (2026).

### Matriz de identificación de impactos ambientales

[www.unicesar.edu.co](http://www.unicesar.edu.co)

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

Valledupar – Cesar, Colombia

**Tabla 24.** Matriz cualitativa de impactos ambientales tipo Leopold

| <b>Actividad</b>                    | <b>Componente ambiental</b> | <b>Impacto identificado</b>                          | <b>Tipo de impacto</b> | <b>Magnitud</b> |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------|------------------------|-----------------|
| Recolección de residuos frutales    | Residuos sólidos            | Disminución de residuos enviados a disposición final | Positivo               | Alto            |
| Lavado y desinfección               | Recurso hídrico             | Consumo de agua                                      | Negativo               | Bajo            |
| Trituración y pulpeo                | Energía                     | Consumo de energía eléctrica                         | Negativo               | Bajo            |
| Uso de peróxido de hidrógeno        | Calidad ambiental           | Generación mínima de efluentes                       | Negativo               | Bajo            |
| Elaboración de papel orgánico       | Recursos forestales         | Sustitución parcial de fibras maderables             | Positivo               | Alto            |
| Compostaje de residuos remanentes   | Suelo                       | Reincorporación de materia orgánica                  | Positivo               | Medio           |
| Producción de papel biodegradable   | Ambiente en general         | Reducción de residuos persistentes                   | Positivo               | Alto            |
| Aprovechamiento de biomasa residual | Economía circular           | Valorización de residuos orgánicos                   | Positivo               | Alto            |

Fuente: Adaptado de Leopold et al. (1971) y Conesa (2010).

La evaluación ambiental permitió identificar una predominancia de impactos positivos sobre los negativos durante el proceso de elaboración del papel orgánico. El principal beneficio ambiental estuvo asociado al aprovechamiento de residuos frutales que normalmente son destinados a disposición final o abandonados en sistemas de recolección convencional. La transformación de estos residuos en materia prima para la producción de papel contribuyó a disminuir la carga de residuos orgánicos y favoreció la implementación de estrategias de economía circular.

De acuerdo con Leopold et al. (1971), los proyectos que promueven la reutilización de materiales residuales generan impactos positivos significativos al reducir la presión sobre los sistemas de disposición final y disminuir los efectos asociados a la descomposición de residuos orgánicos. En la presente investigación, el aprovechamiento de cáscaras de sandía, mango y plátano permitió valorizar subproductos agrícolas que normalmente carecen de uso productivo.

Asimismo, la utilización de fibras vegetales residuales representa una alternativa sostenible frente al uso de materias primas forestales convencionales empleadas en la industria papelera. Según Conesa (2010), la sustitución parcial de recursos naturales por materiales reciclados o reutilizados constituye una de las estrategias más efectivas para disminuir los impactos ambientales de los procesos productivos.

En cuanto a los impactos negativos identificados, estos estuvieron relacionados principalmente con el consumo de agua durante las etapas de lavado y acondicionamiento de la biomasa, así como con el uso de energía eléctrica para la trituración y secado de las muestras. No obstante, la magnitud de dichos impactos fue

considerada baja debido a la escala experimental del proyecto y al reducido volumen de materia prima procesada.

Por otra parte, la generación de residuos secundarios fue mínima, ya que la mayor parte de los materiales descartados durante el proceso correspondió a residuos orgánicos biodegradables que pudieron ser destinados a compostaje o reincorporados al sistema productivo. Esta característica coincide con los principios de producción limpia y aprovechamiento integral de biomasa descritos por diversos autores en el campo de la economía circular.

Los resultados también guardan relación con los hallazgos reportados por Chávez y Medina (2024), quienes concluyeron que la producción de papel ecológico a partir de residuos vegetales constituye una alternativa ambientalmente favorable debido a la reducción de residuos sólidos y al aprovechamiento de materiales orgánicos disponibles localmente. De manera similar, Flores et al. (2022) destacaron que los procesos de fabricación de papel alternativo contribuyen a disminuir la presión sobre los recursos naturales y favorecen la gestión sostenible de residuos.

En términos generales, el balance ambiental obtenido fue favorable, evidenciando que la producción de papel orgánico a partir de residuos de sandía, mango y plátano presenta una alta viabilidad ambiental. Los beneficios asociados a la valorización de residuos, la reducción potencial del uso de fibras maderables y la obtención de un producto biodegradable superaron ampliamente los impactos negativos identificados durante el proceso experimental, consolidando esta alternativa como una opción sostenible para el aprovechamiento de biomasa residual.

## **6.5 Potenciales aplicaciones, limitaciones y oportunidades de mejora del papel orgánico elaborado**

### **6.5.1 Evaluación visual y funcional del prototipo obtenido**

La inspección visual de las láminas elaboradas evidenció la formación exitosa de una estructura continua y estable, confirmando la viabilidad técnica de transformar residuos de sandía, mango y plátano en un material con características similares al papel artesanal. No obstante, se observaron ciertas particularidades asociadas a la naturaleza de las materias primas utilizadas, entre ellas una coloración beige-marrón, una textura relativamente rugosa y la presencia de pequeñas partículas fibrosas visibles sobre la superficie.

Estas características son comunes en papeles elaborados a partir de fibras vegetales no maderables y reflejan la ausencia de procesos industriales de refinado y blanqueamiento intensivo (Bajpai, 2018). Aunque dichas propiedades no afectan la integridad estructural del material, sí pueden limitar algunas aplicaciones convencionales que requieren superficies uniformes y altos niveles de blancura.

### **6.5.2 Limitaciones identificadas en el prototipo desarrollado**

Los resultados obtenidos permitieron identificar algunas limitaciones inherentes a esta primera etapa de desarrollo experimental (ver tabla 25):

**Tabla 25.** *Limitaciones observadas en el papel elaborado*

| <b>Aspecto<br/>evaluado</b> | <b>Limitación identificada</b> | <b>Posible causa</b> |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------|
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------|

|                        |                                  |                                                       |
|------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Color                  | Tonalidad beige oscura           | Presencia de lignina y compuestos fenólicos naturales |
| Textura                | Superficie rugosa                | Tamaño de fibra y molienda limitada                   |
| Uniformidad            | Variación en espesor             | Distribución manual de la pulpa                       |
| Escritura convencional | Menor contraste con tinta oscura | Color natural del material                            |
| Acabado superficial    | Presencia de partículas visibles | Refinado parcial de fibras                            |

Fuente: Elaboración propia (2025).

Estas limitaciones son consistentes con lo reportado por Santos (2024), quien encontró que los materiales papeleros elaborados a partir de fibras vegetales tropicales presentan tonalidades naturales más oscuras que los papeles comerciales debido a la permanencia de lignina residual. Asimismo, Chávez y Medina (2024) señalan que la homogeneidad superficial depende en gran medida del nivel de refinamiento de la pulpa y de los tratamientos de blanqueamiento aplicados.

#### **6.4.3 Aplicaciones potenciales del papel orgánico elaborado**

A pesar de las limitaciones observadas, el material desarrollado mostró propiedades físicas suficientes para diversas aplicaciones donde la apariencia natural constituye una ventaja más que una desventaja.

**Tabla 26.** *Aplicaciones potenciales del papel orgánico*

| Aplicación | Viabilidad | Justificación |
|------------|------------|---------------|
|------------|------------|---------------|

|                                  |       |                                                              |
|----------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------|
| Etiquetas ecológicas             | Alta  | Material biodegradable y resistente                          |
| Empaques artesanales             | Alta  | Buena rigidez y apariencia natural                           |
| Tarjetas ecológicas              | Alta  | Valor agregado ambiental                                     |
| Papel para manualidades          | Alta  | Textura adecuada para trabajos artísticos                    |
| Decoración y papelería artesanal | Alta  | Aspecto rústico atractivo                                    |
| Material educativo ambiental     | Alta  | Permite evidenciar procesos de reciclaje y economía circular |
| Cuadernos convencionales         | Media | Requiere mejora en blancura y acabado                        |
| Impresión comercial              | Baja  | Necesita mayor uniformidad superficial                       |

Fuente: Elaboración propia (2026).

De acuerdo con Flores et al. (2022), los papeles alternativos elaborados a partir de residuos orgánicos poseen un amplio potencial para mercados artesanales y ecológicos, donde los consumidores valoran las características naturales del material y su bajo impacto ambiental. En este sentido, el color y la textura observados en el presente estudio pueden considerarse atributos diferenciadores más que defectos, dependiendo del uso previsto.

#### **6.5.4 Perspectivas de mejora para investigaciones futuras**

Aunque el prototipo desarrollado demostró ser técnicamente viable, futuras investigaciones podrían optimizar sus propiedades mediante:

- Incremento de los procesos de refinado de fibras.

- Aplicación de tratamientos de blanqueamiento ecológico con peróxido de hidrógeno.
- Incorporación de fibras vegetales complementarias con mayor contenido de celulosa.
- Evaluación de recubrimientos biodegradables para mejorar la superficie de escritura.
- Implementación de sistemas de prensado de mayor presión para incrementar la uniformidad del material.

Según Bajpai (2018), estas estrategias permiten mejorar significativamente las propiedades visuales y mecánicas de los papeles elaborados a partir de biomasa residual sin comprometer su biodegradabilidad.

El desarrollo de este prototipo constituye una evidencia de que residuos agrícolas comúnmente descartados pueden transformarse en materiales funcionales con valor agregado. Si bien el papel obtenido no pretende reemplazar completamente al papel industrial convencional, sí representa una alternativa sostenible para aplicaciones específicas, contribuyendo a la valorización de residuos orgánicos, la reducción de la presión sobre recursos forestales y la promoción de modelos de producción basados en principios de economía circular. Como señalan Ashori (2006) y Bajpai (2018), el futuro de la industria papelera sostenible dependerá en gran medida de la diversificación de fuentes fibrosas alternativas y del aprovechamiento eficiente de biomasa residual actualmente subutilizada.

## 7. CONCLUSIONES

La caracterización fisicoquímica permitió establecer que los residuos de sandía, plátano y mango presentan condiciones adecuadas para su aprovechamiento como materia prima en la elaboración de papel orgánico. Los análisis de humedad evidenciaron contenidos de 89,4 % para la sandía, 74,8 % para el mango y 68,3 % para el plátano, confirmando la necesidad de un proceso previo de secado para garantizar la estabilidad de la biomasa. Asimismo, los valores de pH obtenidos oscilaron entre 5,4 y 6,3, indicando una naturaleza ligeramente ácida que no representó limitaciones para el proceso de pulpeo. La evaluación colorimétrica mostró tonalidades naturales entre verde claro, amarillo y beige, características propias de materiales lignocelulósicos que pueden ser aprovechadas en la producción de papeles ecológicos.

La evaluación de las formulaciones experimentales permitió identificar una mezcla óptima compuesta por 50 % de residuo principal (sandía o mango), 50 % de plátano, 30 g de almidón, 5 mL de glicerina, 5 mL de ácido acético y 70 mL de agua. De las tres formulaciones ensayadas, únicamente la Muestra 2 presentó una adecuada cohesión estructural, flexibilidad y estabilidad durante el secado, mientras que las muestras 1 y 3 desarrollaron grietas y deformaciones que limitaron su utilización. Los resultados demostraron que el equilibrio entre la cantidad de biomasa, agua y aditivos influyó directamente en la calidad final del papel, permitiendo obtener una pulpa homogénea y una adecuada formación de la lámina. Por tanto, se concluyó que la optimización de la

mezcla constituye un factor determinante para garantizar el desempeño físico y mecánico del material elaborado.

Las pruebas físicas realizadas demostraron que las dos combinaciones evaluadas fueron técnicamente viables para la producción de papel orgánico biodegradable. La formulación Sandía–Plátano presentó los mejores resultados globales, alcanzando una densidad de 2,45 g/cm<sup>3</sup>, una resistencia promedio a la tracción de 4,54 N y una biodegradabilidad de 7,20 % después de 24 horas de enterramiento en suelo. Por su parte, la combinación Mango–Plátano registró una densidad de 1,87 g/cm<sup>3</sup>, una resistencia de 3,83 N y una biodegradabilidad de 5,60 %. Estos resultados evidenciaron que ambas formulaciones poseen propiedades físicas suficientes para aplicaciones básicas como papel artesanal, material de empaque liviano, etiquetas ecológicas y productos decorativos biodegradables. No obstante, la combinación Sandía–Plátano mostró una mayor compactación de fibras, mejor resistencia mecánica y una degradación ambiental más favorable, consolidándose como la alternativa con mejor desempeño técnico dentro de las condiciones evaluadas.

La investigación demostró la viabilidad técnica y ambiental de producir papel orgánico a partir de residuos de sandía, mango y plátano, contribuyendo al aprovechamiento de biomasa residual y a la implementación de principios de economía circular. Los resultados obtenidos evidenciaron que los residuos frutales pueden transformarse en materiales funcionales con propiedades físicas adecuadas para aplicaciones básicas, reduciendo simultáneamente la cantidad de residuos orgánicos

destinados a disposición final y generando alternativas sostenibles frente al uso exclusivo de fibras maderables convencionales.



## **8. RECOMENDACIONES**

- Evaluar períodos más prolongados de biodegradabilidad (15, 30, 60 y 90 días) para determinar con mayor precisión el comportamiento ambiental del papel orgánico en condiciones reales de degradación.
- Realizar análisis químicos complementarios de celulosa, hemicelulosa y lignina en cada residuo vegetal con el fin de establecer relaciones más precisas entre la composición de la biomasa y las propiedades mecánicas del papel obtenido.
- Incorporar nuevas fuentes de fibras vegetales residuales, como cáscaras de piña, tallos de maíz, bagazo de caña o pseudotallos de plátano, para ampliar las posibilidades de formulación y mejorar las características físicas del producto final.
- Evaluar propiedades adicionales como absorción de agua, gramaje, porosidad, resistencia al rasgado y resistencia al plegado, con el fin de comparar el desempeño del papel orgánico frente a productos comerciales.
- Analizar la viabilidad económica del proceso mediante estudios de costos de producción, escalamiento y comercialización, que permitan determinar su potencial de implementación a nivel comunitario o agroindustrial.
- Explorar alternativas de blanqueamiento ecológico utilizando peróxido de hidrógeno, ozono o extractos naturales, con el propósito de mejorar la apariencia visual del papel sin generar impactos ambientales significativos.
- Desarrollar estudios piloto a mayor escala que permitan validar la reproducibilidad de los resultados obtenidos en laboratorio y determinar el comportamiento del proceso en condiciones semindustriales.

- Investigar la incorporación de colorantes naturales, semillas o aditivos biodegradables que permitan diversificar los usos potenciales del papel orgánico en sectores como empaques sostenibles, artesanías, papelería ecológica y educación ambiental.



**BIBLIOGRAFIA**

- Ahmed, S., Khan, M. R., & Farooq, A. (2022). Natural additives in paper production: Improving strength and durability. *Journal of Sustainable Materials*, 14(3), 45-56.  
<https://doi.org/10.1016/j.smat.2022.03.005>
- Bajpai, P. (2021). *Pulp and paper industry: Raw material and technologies*. Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/C2019-0-01364-2>
- Chauhan, A., Kumar, R., & Sharma, P. (2023). Physical properties of eco-friendly papers from agro-residues. *Cellulose Chemistry and Technology*, 57(1-2), 15-26.
- Chaupi Umiri, E., & Gibaja Carrasco, T. K. (2024). *Valorización de residuos orgánicos: Fabricación artesanal de papel ecológico utilizando la boñiga de la granja escuela de Yucay, provincia de Urubamba – Cusco*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Chávez Pinto, K. Y., & Medina Arosquipa, D. R. (2024). *Proceso de elaboración de papel ecológico en base a residuos vegetales del Mercado Mayorista Acomare, Arequipa*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- FAO. (2022). *The state of food and agriculture 2022: Leveraging waste for sustainability*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Flores, L., Nava, C., García, D., Platero, D., & Baldovinos, I. (2022). *Autosustentabilidad en la elaboración de productos a base de papel reciclado*. Universidad Hipócrates.
- García, M., & Pérez, L. (2023). Producción artesanal y semi-industrial de papel orgánico: desafíos y oportunidades. *Revista de Innovación Ambiental*, 12(1), 45-58.

- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2020). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gómez, F., & Lara, C. (2021). Influencia del prensado en las propiedades mecánicas del papel reciclado. *Tecnología y Ambiente*, 9(3), 78-90.
- Hernández, A., Torres, J., & Silva, P. (2022). Efectos de la proporción fibra-agua en la calidad del papel artesanal. *Ciencia y Desarrollo Sostenible*, 15(2), 32-44.
- Hidalgo, J., Rodríguez, M., & Pineda, C. (2017). Elaboración de papel a partir de residuos orgánicos vegetales. *Revista de Innovación y Desarrollo*.
- ISO. (2022). ISO 1924-2:2022. Paper and board — Determination of tensile properties. International Organization for Standardization.
- Jiménez, D., & Rojas, E. (2023). Optimización del tiempo de maceración en la elaboración de papel a partir de fibras vegetales. *Producción Verde*, 8(4), 66-75.
- Kaur, H., & Singh, A. (2023). Non-wood fibers as sustainable raw materials for paper. *Bioresources*, 18(2), 3205-3220.
- Kumar, P., Singh, V., & Gupta, R. (2022). Pressing methods for enhancing paper sheet quality. *Applied Engineering in Agriculture*, 38(6), 819–827.
- Liu, Y., Zhang, X., & Chen, M. (2021). Controlled drying processes for improved paper performance. *Industrial Crops and Products*, 170, 113758. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113758>
- López, R., & Castillo, M. (2020). Métodos de trituración y su impacto en la calidad del papel reciclado. *Ingeniería y Ambiente*, 7(1), 55-64.

- Lopez-Maldonado, A., Sánchez, R., & Ortega, L. (2022). Secado del papel artesanal: comparación entre métodos solares y térmicos. *Revista de Procesos Industriales*, 10(2), 120-134.
- Lopez-Maldonado, E. A., Hernández, D., & Vargas, R. (2022). Sustainable paper production from agro-industrial residues: A review. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131882. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131882>
- Madhavan, A., Sindhu, R., Binod, P., & Pandey, A. (2020). Development of eco-friendly paper from agricultural residues. *Bioresource Technology*, 310, 123451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123451>
- Martínez, V., Peña, L., & Cruz, S. (2022). Uso de aditivos naturales en la producción de papel orgánico. *Ciencia y Tecnología de Materiales*, 14(3), 101-110.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2021). Water footprint assessment of paper production. *Water Resources and Industry*, 25, 100142. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100142>
- Mendoza, P., & Ruiz, J. (2021). Selección y preparación de materia prima para papel artesanal. *Innovación Rural*, 6(2), 22-34.
- Meza, R. (2019). Diseño de mezclas para producción de bioplásticos. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Mwaikambo, L. Y., & Ansell, M. P. (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*.
- OECD. (2022). Sustainable innovation: Driving green growth. Organisation for Economic Co-operation and Development.

- Peña Giraldo, J. A., & González Peña, R. O. (2022). *Estudio de prefactibilidad para la producción de pulpa para papel aprovechando los desechos del cultivo del plátano en la región del Viejo Caldas*. Manizales: Universidad de Caldas.
- Santos Roza, G. A. (2024). *Propuesta para la elaboración de papel biodegradable a partir de la planta de plátano en Procol S.A.S por medio del método a la sosa*.
- Shanmugarajah, B., Thangavel, S., & Rajendran, S. (2021). Organic waste-based paper production: An eco-friendly alternative. *Waste Management*, 120, 305–313.  
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.025>
- Singh, R., Kumar, S., & Yadav, M. (2022). Biodegradability assessment of alternative papers. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 41(5), e13758.  
<https://doi.org/10.1002/ep.13758>
- United Nations. (2023). *Measuring environmental impacts*. UN Environment Programme.
- Vargas, L., Díaz, M., & Herrera, J. (2022). Efecto del lavado en la durabilidad del papel artesanal. *Producción y Ambiente*, 5(1), 17-26.
- Wang, Z., Li, J., & Sun, Y. (2022). Structural characteristics of cellulose and its industrial applications. *Carbohydrate Polymers*, 278, 118987.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118987>
- Zhao, L., Huang, J., & Wu, D. (2023). Advances in sustainable paper production from agricultural residues. *Journal of Environmental Management*, 338, 117688.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117688>
- Bajpai, P. (2018). *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*. Springer.

Hubbe, M. A., et al. (2020). Environmentally friendly bleaching technologies for cellulosic fibers. *BioResources*, 15(1), 2169–2234.



## ANEXOS

### Anexo 1. Pretratamiento de la materia prima



PROCESO DE SECADO



PROCESO DE SECADO



PROCESO DE SECADO



MESOCARPIO DE MANGO



PROCESO DE MOLIENDA



Anexo 2. Caracterización de la materia prima



DETERMINACIÓN DE  
DENSIDAD



DETERMINACIÓN DE  
DENSIDAD



PRUEBA DE COLOR

Anexo 3. Elaboración del papel



PREPARACIÓN DE MEZCLAS  
DEL PAPEL



Anexo 4. Papel elaborado



