



PRISMA ODS
REVISTA MULTIDISCIPLINARIA
SOBRE DESARROLLO SOSTENIBLE
ISSN: 3072-8452

**ECONOMÍA CIRCULAR EN
EL RECICLAJE DE PAPEL,
OBTENIENDO
MATERIALES DE VALOR
AGREGADO**

**CIRCULAR ECONOMY IN
PAPER RECYCLING,
OBTAINING VALUE-ADDED
MATERIALS**

AUTORES

LEILANI VIANEY MUÑOZ
LINARES
UNIVERSIDAD
INTERAMERICANA
MÉXICO

VIVIANA MICHELLE MUÑOZ
LINARES
UNIVERSIDAD
INTERAMERICANA
MÉXICO

DIEGO HERNAN CUATE
GOMEZ
INSTITUTO TECNOLÓGICO
SUPERIOR PROGRESO
MÉXICO

Economía Circular en el Reciclaje de Papel, Obteniendo Materiales de Valor Agregado

Circular Economy in Paper Recycling, Obtaining Value-Added Materials

Leilani Vianey Muñoz Linares

Munozlinaresleilani1a@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0004-9718-9950>

Universidad Interamericana

Puebla - México

Viviana Michelle Muñoz Linares

Munozliaresvivila@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-2738-3798>

Universidad Interamericana

Puebla - México

Diego Hernan Cuate Gomez

dhcg.inv@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-1741-0009>

Instituto Tecnológico Superior Progreso

Yucatán -México

Artículo recibido: 05/01/2026

Aceptado para publicación: 12/02/2026

Conflictos de Intereses: Ninguno que declarar

RESUMEN

La investigación se enmarca en el imperativo de la Economía Circular (EC) para transformar la industria del papel, un material de alto índice de reciclaje a nivel mundial. La circularidad se ve amenazada por la degradación estructural de la fibra—fenómeno conocido como hornificación —que reduce la resistencia mecánica del papel reciclado. Además, el proceso de producción es intensivo en el consumo de agua y energía. Y enfrenta la propagación de Contaminantes Químicos de Preocupación (CQPs). Refuerzo de la Fibra: Se utiliza el almidón (fécula de maíz) como un aditivo accesible que funciona como agente de refuerzo y retención, creando puentes de hidrógeno adicionales para restaurar la resistencia perdida. Valorización de Residuos (*Waste-to-Value*): La fibra no apta se reorienta hacia la creación de materiales de alto valor, como mortero ligero y laminados de alta presión (HPL), que ofrecen resistencia a la flexión y al fuego. Sostenibilidad Hídrica: Se busca la recirculación del agua de proceso mediante el uso de agua pluvial y tecnologías de tratamiento eficiente, como la cavitación hidrodinámica y la flotación, para mejorar la separación de contaminantes como la tinta y los sólidos suspendidos. Estos ejes definen un modelo para validar cómo la integración de soluciones químicas accesibles y de gestión de residuos puede garantizar la producción de materiales de valor agregado.

Palabras clave: economía circular (CE), papel reciclado, hornificación, almidón (fécula de maíz), refuerzo de fibra

ABSTRACT

The research is framed within the imperative of the Circular Economy (CE) to transform the paper industry, a material with a high global recycling rate. Circularity is threatened by the structural degradation of the fiber—a phenomenon known as hornification—which reduces the mechanical strength of recycled paper. Furthermore, the production process is intensive in water and energy consumption and is prone to the spread of Chemical Contaminants of Concern (CCPs). Fiber Reinforcement: Starch (cornstarch) is used as an accessible additive that serves as a strengthening and retention agent, forming additional hydrogen bonds to restore lost resistance. Waste-to-Value: Unsuitable fiber is reoriented toward the creation of high-value materials, such as lightweight mortar and High-Pressure Laminates (HPL), which offer flexural and fire resistance. Water Sustainability: The study aims to achieve process water recirculation by using rainwater and efficient treatment technologies, such as hydrodynamic cavitation and flotation, to improve the separation of contaminants, including ink and suspended solids. These key areas define a model for validating how integrating accessible chemical solutions and waste management can ensure the production of value-added materials.

Keywords: circular economy (CE), recycled paper, baking, starch (cornstarch), fiber reinforcement

INTRODUCCIÓN

El imperativo de transitar hacia una Economía Circular (EC) impulsa la búsqueda de modelos de producción y consumo que maximicen la eficiencia de los recursos y minimicen el impacto ambiental (Awoyera et al., 2021; Mofokeng et al., 2024). La industria de la celulosa y el papel se destaca por su potencial de ser una bioeconomía de ciclo cerrado, siendo el material de mayor tasa de reciclaje a nivel mundial (Anisa et al., 2022; Zhang et al., 2016). Sin embargo, la circularidad del papel no está exenta de desafíos que comprometen su sostenibilidad a largo plazo (Ang et al., 2021).

Actualmente la promesa de un ciclo de vida verdaderamente circular se ve constantemente desafiada por barreras operativas, químicas y materiales. La degradación irreversible de las propiedades de las fibras tras ciclos repetidos de procesamiento, conocido como hornificación (Anisa et al., 2022). Este fenómeno se debe a la formación de enlaces de hidrógeno irreversibles durante el secado (Balaga & Nanthagopalan, 2016), lo que reduce la capacidad de hinchamiento y la resistencia del papel reciclado (Anisa et al., 2022; Marques et al., 2017). A esta problemática se suman retos de eficiencia operativa y contaminación ambiental (Awoyera et al., 2021; Shen et al., 2021). La producción es intensiva en el consumo de agua y energía (Ang et al., 2021), y genera subproductos y aguas residuales con altas cargas contaminantes y microbianas que exigen soluciones de gestión complejas (Awoyera et al., 2021; Tsatsis et al., 2017). Para que el papel cumpla su rol como material verdaderamente circular y cumpla con el reciclaje, es esencial que la investigación aborde tres ejes de innovación interconectados que busquen compensar la degradación de la fibra, minimizar la huella de carbono y maximizar la valorización de todos los residuos.

El uso de polímeros accesibles como el almidón (fécula de maíz) es fundamental. El almidón (fécula de maíz) funciona como un agente de refuerzo creando un papel resistente y que su fibra no se dañe (Lee et al., 2013). La optimización de los procesos de limpieza (Dexter et al., 2019) y el uso de almidón y agua pluvial son necesarios para mejorar la calidad superficial y la eficiencia del filtrado (Naijian et al., 2019).

El papel de diseño se revaloriza como agregado porque nuestro proyecto trata de darle una segunda oportunidad real a esas hojas usadas. Cuando reciclamos papel en casa, la fibra se vuelve débil y quebradiza. Estamos usando un ingrediente tan común como la Maizena (almidón) para 'coser' esa fibra degradada. El almidón actúa como un pegamento invisible, haciendo que la hoja no solo se mantenga unida, sino que sea más resistente, más lisa y mejor para escribir. De esta forma, cada hoja de papel reciclado que hagamos será realmente funcional, promoviendo la reutilización de forma práctica y creativa (Awoyera et al., 2021). La fibra reciclada también se utiliza en la fabricación de nuevos materiales reciclados como el

cartón con resistencia mejorada a ser más resistentes a golpes o agua (Bayatkashkoli et al., 2018).

La presente investigación busca neutralizar la contaminación y reciclar papel para reducir la huella de carbono y demostrar que la integración del papel artesanal hecho con otros papeles reciclados, la optimización de procesos y la valorización de residuos, son los pilares de un ecosistema circular

Se evaluó la aplicación sinérgica mediante la renovación manual en el reciclaje de papel, en la gestión de sus contaminantes y en la valorización de sus productos reciclados para validar un modelo de Economía Circular que garantice la producción de materiales con valor agregado. Determinamos la eficacia del almidón como aditivo de refuerzo para mejorar las propiedades físico-mecánicas y la funcionalidad del papel reciclado.

Se investigó el uso de residuos de papel en la creación de nuevos materiales compuestos (mortero, cemento, laminados) y analizar su rendimiento (Awoyera et al., 2021), (Bayatkashkoli et al., 2018). Analizamos la viabilidad y eficiencia de tecnologías accesibles para la sostenibilidad hídrica del proceso de fabricación, como el uso de agua pluvial y el tratamiento de efluente (Costa et al., 2021), (Kosel et al., 2020). El reciclaje de papel surgió en China antigua con trapos, evolucionando a procesos industriales en el siglo XIX con pulpas mecánicas. Hoy, supera el 60% de tasa global, pero ciclos múltiples degradan fibras en un 30-50% por hornificación. Estudios pioneros como los de Lee et al. (2013) identificaron aditivos amiláceos para mitigar esto, inspirando enfoques de valorización de residuos.

En México, iniciativas locales recolectan papel usado para artesanías, pero carecen de refuerzo técnico. Esta brecha motiva integrar ciencia accesible con prácticas cotidianas, extendiendo la vida útil de fibras más allá de 5-7 ciclos. La viabilidad del reciclaje continuo de papel se ve comprometida por el deterioro irreversible de las fibras celulósicas. Este fenómeno, conocido como hornificación, se define como la pérdida de la capacidad de la fibra para hincharse completamente tras repetidos ciclos de secado y remojo. La hornificación reduce el área superficial y la flexibilidad de la fibra, lo que resulta en una drástica disminución en la formación de puentes de hidrógeno intermoleculares. Como consecuencia directa, el papel reciclado exhibe una baja resistencia a la tracción y al desgarro. La tasa de degradación puede variar, afectando la vida útil de las fibras y generando un flujo constante de material que ya no es apto para el papel de alta calidad. Para mitigar la pérdida de resistencia estructural, nuestra investigación se apoya en el uso de aditivos poliméricos. El almidón (fécula de maíz), es un aditivo probado que actúa como un agente de refuerzo al suplir los enlaces de hidrógeno perdidos.

El almidón funciona creando puentes de hidrógeno adicionales entre las fibras celulósicas dañadas. Al incorporarlo a la pulpa, el polímero amiláceo se adhiere a la superficie de la fibra, proporcionando un anclaje molecular que mejora la cohesión y la integridad estructural de la pulpa final. Más allá de la resistencia, el almidón mejora las propiedades de la pulpa (sizing), reduciendo la porosidad y mejorando la calidad superficial. Esto es esencial para el uso funcional del papel (capacidad de escritura).

El proceso de reciclaje de papel es intensivo en el consumo de agua, lo que justifica la búsqueda de alternativas hídricas y métodos de recirculación: validamos el uso de agua pluvial como solvente de proceso, demostrando una fácil solución de bajo costo para reducir la dependencia del agua dulce potable. Este enfoque se alinea con investigaciones más complejas que estudian el tratamiento de agua de lluvia mediante métodos sencillos como la filtración con mantas acrílicas.

El uso de Tratamiento de Aguas Residuales o pluviales es esencial para el tratamiento, desinfección y recirculación eficiente del agua de proceso a escala industrial para evitar introducir a la pulpa algún residuo que afecte el papel. La fase de limpieza y destinada en el reciclaje es el punto mayor en donde reciclamos y juntamos todos los pápeles reciclados ya sean de impresiones no utilizadas y hojas con uso.

Las tintas modernas, especialmente el tóner líquido, son difíciles de eliminar con los métodos convencionales. Esto obliga a un pulpeo más intenso o al uso de más aditivo (maízena). Para el secado de nuestro papel utilizamos luz solar exponiendo el papel al sol y secado natural. Esto justifica el esfuerzo por encontrar soluciones que minimicen la intervención química y energética

Se disminuye directamente la necesidad de talar árboles, protegiendo los bosques al usar fibras ya existentes. Logra un significativo ahorro de agua y energía en comparación con la producción de papel virgen. Se reduce la presión sobre los rellenos sanitarios, desviando toneladas de papel y disminuyendo la liberación de gases contaminantes (como el metano). Nuestra principal implicación es reducir masivamente la huella ecológica de la producción de papel. La función de este proyecto es transformar algo visto como "basura" en una materia prima valiosa, reconociendo el potencial latente en cada hoja usada.

La investigación se enfoca en productos desechados en otros nuevos como lo es papel reciclado, el contexto general de nuestras fuentes refuerza la importancia de no desechar la fibra en absoluto: demostramos que la fibra débil puede ser útil con un aditivo accesible, apoyando la idea de aprovechar al máximo la vida útil de la fibra antes de que se convierta en un residuo de valor secundario. Una de las fases cruciales en esta investigación es que nos

encargamos de guiar el papel residual a través de etapas clave como limpiar y separar el papel, desintegrar el papel con agua para que "renazca" como pulpa de fibra, limpiar, prensar y secar la pulpa para completar el nuevo ciclo de vida del papel y que los residuos no se vean como un final, sino como un recurso al inicio de otra historia, siendo la clave para un futuro más sostenible. Rectificamos un protocolo de fabricación simple, accesible y reproducible que fomenta la reutilización efectiva de residuos de papel. El almidón es la clave para restaurar la funcionalidad del papel degradado, demostrando que al experimentar con ciertos materiales puede aplicarse con insumos cotidianos. Requerimos la continuación del análisis al hacer más pruebas para que el papel no se desgarre y para determinar con precisión la dosis óptima de almidón que maximice la resistencia sin inducir fragilidad.

Para comprender la función del aditivo, es esencial entender el problema estructural y la solución química. Las fibras celulósicas del papel, al ser recicladas y pasar por ciclos de secado y remojo, pierden su habilidad para hincharse y unirse, como lo aviamos comentado anteriormente. El papel reciclado tiene una pérdida de resistencia significativa en comparación con la fibra virgen. Nuestro proyecto busca solucionar esta debilidad inherente. El almidón (fécula de maíz) actúa como un polielectrolito y agente de retención. Cuando se incorpora a la pulpa, las moléculas de almidón se expanden. Al secarse en la hoja de papel, estas moléculas se insertan entre las fibras y crean puentes de hidrógeno adicionales, actuando como un pegamento interno. Esto ayuda a compensar la disminución de uniones causadas por la hornificación, mejorando la resistencia a la tracción y la rigidez superficial del papel. Además de reforzar, el almidón mejora la retención de partículas muy pequeñas de fibra que se pierden fácilmente en el drenaje, contribuyendo a una hoja más densa y uniforme. También mejora las propiedades superficiales, como la capacidad de escribir y la reducción de la absorción de tinta.

La elección del agua pluvial no es solo una elección ecológica, sino una variable metodológica que se usamos para reducir alguna vinculación con el agua limpia. El proceso de reutilización de papel es intensivo en el consumo de agua. Utilizamos el agua de lluvia por que reduce la demanda de tener que recurrir al agua potable, alineándose directamente con las prácticas de sostenibilidad, reutilizando el agua pluvial. El agua de lluvia requiere una filtración simple, se utiliza para usos de proceso en entornos de fabricación, lo que valida su elección como solvente primario. Esto es un paso crucial hacia el cierre del ciclo hídrico de su proceso. En esta investigación la fibra utilizada proviene de un circuito contaminado, lo que justifica la necesidad de una limpieza inicial. El papel reciclado posconsumo es una fuente de Contaminantes Químicos de Preocupación (CQPs). Estos aditivos de recubrimiento que se liberan en el agua durante el remojo y el licuado. El riesgo de estos contaminantes es que tienen la capacidad de persistir en la pulpa, afectando la calidad del producto final. Esto nos hace tener

en cuenta la importancia de realizar el pulpeo, lo más eficiente posible, ya que la separación de tintas y finos es el primer paso para mitigar el riesgo químico. Al licuar el papel es el simplificado análogo del pulpeo industrial. Su eficiencia influye directamente en la calidad del papel. En el pulpeo simple lo que se hace es remojar el papel ya hecho en pequeños cortes y ponerlos en agua pluvial y esperar a que se remojen, mientras que en la industria se utilizan tratamientos avanzados como el tratamiento enzimático (con celulasas) o tratamiento con ozono para mejorar la separación de la tinta y reducir la carga de contaminantes. Esto sirve como justificación para la optimización futura de su proceso básico, buscando cómo maximizar la liberación de tinta durante el licuado.

Nuestro enfoque es demostrar que existen soluciones accesibles y de baja tecnología para los problemas que la industria intenta resolver con métodos costosos y de alto consumo energético y sin contaminar reduciendo la huella de carbono. La solución a la hornificación se aborda industrialmente con tecnologías de alto costo como las nano fibras de celulosa (CNF) o aditivos poliméricos sintéticos. Demostramos que la solución de bajo costo (almidón) es viable y necesaria frente a las altas demandas energéticas y costos asociados a los procesos de alta tecnología. Nuestro método de licuado breve y secado ambiental es más eficiente que los procesos industriales de alta presión y temperatura. El éxito en el refuerzo con almidón justifica la adopción de este método de baja energía para la reutilización de la fibra. La temperatura es un factor crítico en el procesamiento de la fibra.

El proceso inicial de remojo (hidratación) de las fibras de diseño se ve acelerado por la temperatura. Las fibras absorben el agua más rápidamente a temperaturas elevadas, lo que facilita el proceso de desintegración y el posterior pulpeo. La activación del almidón es un requisito químico esencial. El almidón debe ser calentado (gelatinizado) en agua, generalmente por encima de 60 a 70, antes de ser añadido a la pulpa. Este proceso rompe los gránulos de almidón, permitiéndole crear los puentes de hidrógeno necesarios para el refuerzo una vez que la pulpa se seca. El éxito de su aditivo depende de esta etapa.

Los aditivos usados en el reciclaje rara vez cumplen una sola función. Por ejemplo, investigamos el uso de compuestos enzimáticos (celulasas) en el pulpeo para ayudar a separar las partículas de tinta y los finos, lo que mejora la calidad y blancura de la pulpa desentintada. El uso de polímeros y aditivos (como su almidón) no solo mejora la resistencia, sino que también influye en la filtrabilidad de la pulpa (drenaje). Aunque el almidón es un buen retenedor, si la pulpa está muy "pegajosa" debido a los residuos, esto puede dificultar el drenaje, afectando el tiempo de secado y la densidad de la hoja.

Al elegir usar agua pluvial solucionamos a un problema industrial muy grave ya que la industria papelera es una gran generadora de efluentes con alta Demanda Química de Oxígeno, sólidos en suspensión y contaminación microbiana. La necesidad de recirculación hídrica ha llevado a la investigación de métodos avanzados. Por ejemplo, la Cavitación Hidrodinámica se estudia como un método de bajo consumo energético para desinfectar y reducir la Demanda Química de Oxígeno del agua residual. Su uso de agua pluvial es una medida preventiva que evita introducir agua potable al circuito, mitigando el problema de las aguas residuales desde el inicio.

Medimos la densidad de la hoja, la cual está influenciada directamente por el proceso de drenaje y el aditivo. Las fibras recicladas tienden a drenar más rápido que la pulpa virgen porque son menos flexibles. Sin embargo, la adición de polímeros como el almidón, que son macromoléculas, puede ralentizar el drenaje. Un drenaje adecuado permite una mayor compactación de las fibras durante la formación (al pasar el rodillo), lo que se traduce en una mayor densidad de la hoja y, consecuentemente, en una mayor resistencia debido a que las fibras están más cerca para formar puentes de hidrógeno.

Como resultado de nuestra investigación preliminar donde las dos tazas rompieron el papel, tiene un claro sustento teórico cuando la concentración de almidón es óptima, mejora la resistencia. Al sobre dosificar, el polímero ya no solo refuerza la unión fibra-fibra, sino que empieza a actuar como aglutinante de la pulpa entera. Cuando se seca este exceso de aglutinante forma una matriz rígida y continua alrededor de las fibras, lo que inhibe la flexibilidad natural de la celulosa [10]. El resultado es una hoja rígida, poco elástica y propensa a la fractura por desgarro, validando su observación inicial.

La turbidez es la variable clave a controlar en el agua pluvial ya que debe ser lo suficientemente limpia para evitar introducir partículas que puedan interferir con la unión del almidón o generar puntos de quiebre en la hoja final. Como observación es que no hubo problema con la contaminación del agua pluvial ya que el agua estaba limpia y no la dejamos expuesta al polvo o al aire que trae muchos bichos.

La resistencia del papel no es una métrica simple, sino que se compone de varias propiedades que el almidón busca mejorar, mide la fuerza requerida para romper la hoja al estirarla. El almidón es muy efectivo para maximizar esta resistencia, ya que depende directamente de la unión interfibrilar (los puentes de hidrógeno).

El almidón aumenta la densidad de la hoja porque ayuda a retener las fibras finas que actúa como agente de retención y maximiza el contacto entre las fibras. Una mayor densidad se

correlaciona generalmente con una mayor resistencia y una superficie más lisa. Mide la fuerza necesaria para propagar un corte ya existente. Aunque el almidón mejora la unión, a menudo existe un compromiso donde la resistencia a la tracción mejora a gastos de la resistencia al desgarro.

La usabilidad del papel se define por su superficie y su interacción con los líquidos. También conocida como encolado, mide la resistencia del papel a la penetración de líquidos. El almidón actúa como un agente de encolado, haciendo que la superficie de la fibra sea menos hidrófila. Su éxito en la prueba de escritura confirma esta mejora funcional. La porosidad de la hoja influye en la absorción de tinta y en la opacidad. Al aumentar la densidad, el almidón reduce la porosidad, lo cual es vital para el aspecto y la funcionalidad del producto final. Al mejorar una propiedad del papel, se corre el riesgo de sacrificar otra, un principio que explica perfectamente el fallo de nuestra prueba inicial es que, al agregar el almidón, se maximiza la rigidez y la resistencia a la tracción, pero una sobredosificación transforma la matriz de celulosa en un aglutinante duro y poco elástico. Este exceso de rigidez se manifiesta en una disminución de la resistencia al desgarro y la fragilidad, que es precisamente el efecto que usted obtuvo cuando el papel "se rompió" con las dos tazas de aditivo

METODOLOGÍA

Tabla 1. Materiales utilizados para el reciclado de papel

CONCEPTO	MATERIALES	DESCRIPCIÓN
Materia Prima de la Fibra	Hojas recicladas de impresiones. Hojas con apuntes. Hojas sin uso.	Papel usado para ser desfibrado.
Líquido	Agua pluvial del mes de septiembre.	Agua de lluvia para la mezcla.
Equipo Eléctrico	Licuadora Marca Oster	Color rojo, vaso de 1,5 L de vidrio, 6 velocidades más pulso, modelo BLSTPEG-CPB de 800 W.
Aditivo	Fécula de maíz Marca: MAIZENA.	Se usa como aditivo de refuerzo.
Contenedores de almacenamiento	Tina de Plástico redonda. Bote. Cubeta.	Color gris, capacidad de 50 L. Contenedor de 20 L de capacidad. Contenedor de 16 L de capacidad, color azul.
Herramientas de Moldeado y Filtrado	Tela mosquitera plástica gris.	Medidas de 1.05 x 30 M.
	Base de madera 1X1.	Marco o soporte de 1x1 (dimensiones no especificadas, posiblemente metros o pies).
	Tela reciclada de una sábana de cama individual.	Para prensado o secado.
	Espátula para revolver	Para mezclar los materiales.
	Rodillo	Para prensar o aplinar.
Equipo de Protección	Guantes de plástico.	Para manipular la pulpa.

Fuente: Elaboración propia.

Preparación y acondicionamiento

En la tabla podemos observar que utilizamos hojas de papel, recolectamos un mínimo de cien hojas de papel usadas de impresiones, apuntes escolares, etc. Días antes, colocamos el bote de veinte litros para recolectar agua pluvial.

Figura 1. Hojas de papel recicladas



Fuente: Elaboración propia.

Remojo y Pulpeo

El papel usado se rompe en trozos pequeños, aproximadamente 1X2 cm y se coloca en la tina de plástico redonda color gris de cincuenta litros. El papel debe ser empapado con el agua pluvial recolectada. Es necesario esperar tres días para que el papel absorba. Para el pulpeo, se prepara la licuadora Marca Oster (de ochocientos watts con vaso de vidrio de uno punto cinco litros) con agua pluvial y un puño de papel remojado. Es crucial no agregar mucho papel para evitar el sobrecalentamiento de la licuadora. Se licúa hasta obtener una pulpa homogénea. Nota: La fécula de maíz se debe integrar a la pulpa en este punto para reforzar la hoja.

Figura 2. Triturado de hojas recicladas en remojo por 3 días

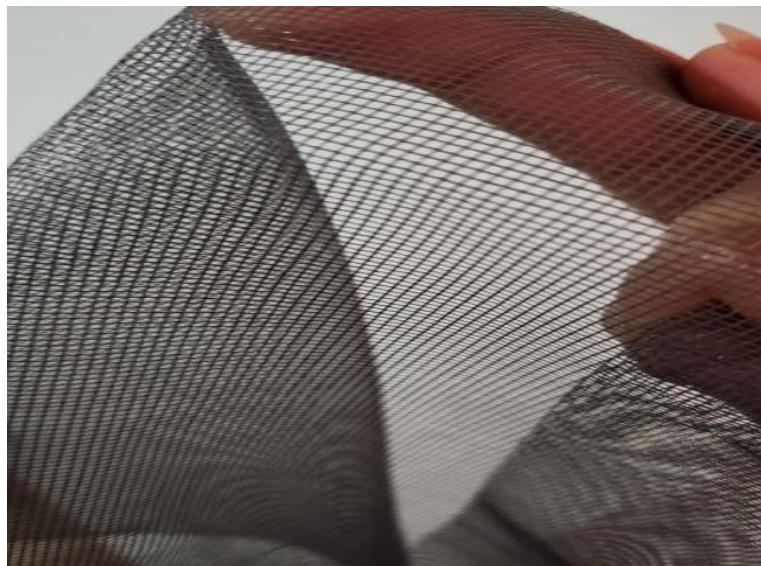


Fuente: Elaboración propia.

Formación de la Hoja y Secado

Se coloca la malla ensamblada en la base de madera. Se vierte la mitad de la pulpa preparada sobre la malla. La pulpa se expande por toda la base para que la hoja quede con un espesor y tamaño uniforme. Para transferir la hoja, se voltean la base de madera, se pasa el rodillo encima de la malla para que la pulpa se despegue para quede expandida sobre la tela reciclada de una sábana de cama individual. Finalmente, se deja secar la hoja.

Figura 3. Malla utilizada para obtener el producto final



Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El hallazgo inicial clave fue que la adición de dos tazas de fécula de maíz resultó en una dosis excesiva y, consecuentemente, en el rompimiento de las hojas de papel reciclado. Este resultado, aunque aparentemente fallido, es crucial. Indica que la alta concentración de polímero amiláceo excedió el punto de refuerzo, lo que provocó una rigidez excesiva en el sustrato. El almidón, al crear un exceso de puentes de hidrógeno que compensan la pérdida de unión por hornificación, causó que la hoja perdiera la flexibilidad necesaria de la celulosa, volviéndose quebradiza. Esto justifica la necesidad de utilizar dosis mucho menores en futuras pruebas para establecer la concentración óptima.

Figura 4. Prueba fallida del pulpeo con adición de fécula de maíz

Fuente: Elaboración propia.

Esperamos que las muestras con dosis reducidas y precisas (1.5% - 4.0% del peso seco) muestren una resistencia notablemente superior al anterior. Este incremento validará que el almidón está funcionando como agente de refuerzo al crear los puentes de hidrógeno necesarios para reestructurar la fibra degradada. La tinta funcionó bien en las muestras. Esto es un resultado positivo que sugiere que el almidón, incluso en dosis altas, mejoró las propiedades y la calidad superficial del papel, reduciendo la porosidad y evitando que la tinta se corra. El requerimiento de obtener un papel más grueso es un ajuste importante ya que el espesor y la densidad están directamente relacionados con la funcionalidad y la rigidez. Para alcanzar una hoja más uniforme y funcional, ajustaremos la técnica de expansión de la pulpa en la criba para el escurrimiento de agua y la nivelación. El funcionamiento del papel es la prueba de que un aditivo tan accesible puede revertir el efecto negativo de la hornificación. Si el papel deja de ser débil, estamos aumentando la vida útil de esa fibra. El papel debe de cumplir con lo anterior y no será "irrompible", sino que encontrará el equilibrio, siendo resistente a la tracción y a la vez flexible al desgarro, lo que da un buen uso de sustrato.

El papel de oficina o periódico que utiliza está hecho de una mezcla de fibras largas (pulpa blanda, que da resistencia) y fibras cortas (pulpa dura, que da suavidad). Los estudios demuestran que las fibras largas, incluso recicladas, retienen una mayor capacidad de refuerzo. Esto significa que si usas más papel de periódico (con mayor proporción de fibras largas), tu papel final será intrínsecamente más fuerte que si solo usas papel de revista (con más cargas y fibras cortas). La tinta residual no eliminada actúa como un contaminante estético y funcional. Las tintas de impresión digital (tóner) son conocidas por su dificultad para separarse de las fibras durante el pulpeo, incluso con tratamientos enzimáticos. La cantidad y el tipo de tinta en

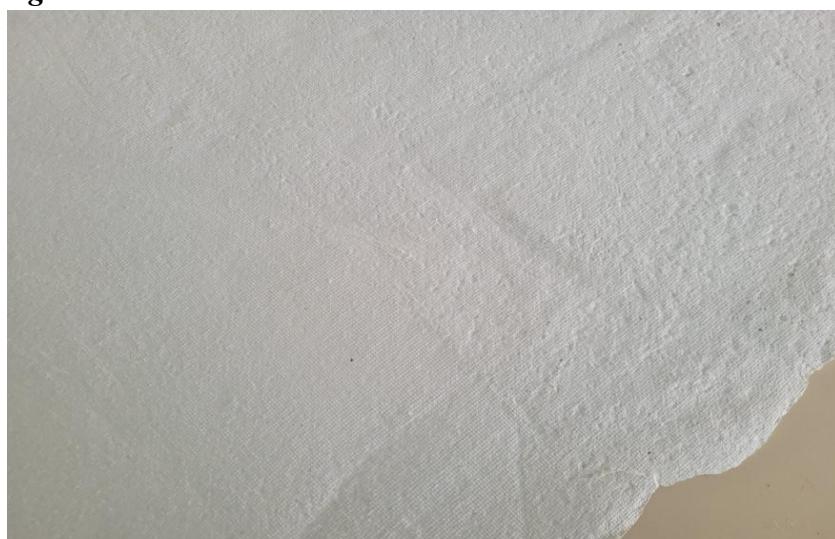
el papel afectan el color final de el sustrato, es una métrica de calidad importante en el reciclaje.

Aunque el agua pluvial no tiene la DQO alta del agua industrial residual, puede contener biocarga (bacterias, levaduras y mohos) que pueden afectar la calidad de la fibra durante el largo proceso de remojo (72 horas).

Los estudios industriales utilizan métodos como la Cavitación Hidrodinámica para desinfectar el agua de proceso de manera eficiente. Este proyecto no utiliza esta tecnología, implica que la biocarga del agua pluvial no es lo suficientemente alta como para dañar significativamente la pulpa durante las 72 horas de remojo. El pH del agua pluvial influye en la eficiencia del almidón como refuerzo, así como en la solubilidad de las cargas minerales. Aunque el almidón funciona bien, el pH ácido (común en el agua de lluvia contaminada) puede afectar ligeramente la integridad de la fibra y del polímero durante un tiempo largo de remojo. El solvente de proceso principal del estudio es el agua pluvial. No tuvimos ningún problema con el agua pluvial utilizada. Validamos la viabilidad del uso de recursos no potables en la fabricación artesanal, un paso práctico hacia la sostenibilidad hídrica.

El proceso inicial de desintegración y remojo se ve acelerado por la temperatura. La activación del almidón es un requisito químico esencial y depende de ser calentado para que sus gránulos se rompan y pueda crear los puentes de hidrógeno. Su éxito demuestra que el proceso artesanal cumplió con estos requisitos termodinámicos. Ahorro de recursos con el método artesanal logramos un ahorro significativo de agua y energía en comparación con la producción de papel no usado. La adopción de este método de baja energía es justificada por el éxito del refuerzo con almidón. Control de Impacto de residuos sanitarios al desviar papel residual, se reduce la presión sobre los residuos, disminuyendo la liberación de gases contaminantes (como el metano). Reducción de tala la investigación disminuye directamente la necesidad de talar árboles al utilizar fibras ya existentes.

Figura 5. Producto final



Fuente: Elaboración propia.

Transformación de excedentes la función principal de esta investigación es transformar lo que se ve como "basura" en una materia prima valiosa, reconociendo el potencial latente en cada hoja usada. Ciclo de vida extendido, nuestra investigación busca extender la vida útil de las fibras más allá de los 5-7 ciclos promedio que tienen las fibras de celulosa, un problema clave que la industria enfrenta. Protocolo replicable y accesible es que la investigación establece un protocolo de fabricación simple, accesible y reproducible. Esto facilita que la ciencia se integre con prácticas cotidianas, como la recolección de papel usado en contextos locales, contribuyendo a la educación ambiental.

Compactación por el uso del rodillo para la compactación final de la pulpa húmeda es un paso metodológico vital. Este proceso consolida la estructura de la fibra y es responsable de la eliminación de agua residual antes del secado ambiental. Una compactación adecuada reduce el volumen de aire en la hoja. El color final de nuestro papel es color blanco/grisáceo y esto se debe principalmente a la tinta residual y a la calidad de la fibra base. El papel de reciclado especialmente el papel de impresiones y de hojas con apuntes tiene un alto contenido de fibras blanqueadas. Al manipular el papel obtuvimos un papel que se rompía de los lados, pero si podíamos escribir en él. Aunque el papel se rompía, requería más almidón para no romperse que el papel sin aditivo. Gracias a esta observación pudimos darnos cuenta de que la fibra estaba débil y no tenía resistencia al desgarro. Y la dosis debe ajustarse para maximizar la resistencia lateral sin caer en una sobredosificación que cause fragilidad. Descubrimos otra falla que fue que tuvimos una mala distribución de la pulpa en los bordes o una compactación insuficiente con el rodillo, lo que requiere un mayor rigor en la etapa de prensado artesanal.

CONCLUSIÓN

La fécula de maíz es un aditivo efectivo para modificar la estructura del papel reciclado, pero su uso requiere rigor experimental. En la prueba inicial confirmamos la necesidad de identificar una dosis óptima y baja que cumpla el rol de agente de refuerzo sin causar fragilidad, logrando un equilibrio entre resistencia y flexibilidad.

Al lograr una buena calidad de escritura y reducir la fragilidad con la dosis correcta, convierte el papel de desecho en un producto funcional y útil. Esto fortalece la reutilización efectiva de residuos a nivel de usuario, alineándose con los principios de valorización. Validamos la viabilidad técnica al integrar el agua pluvial en el proceso de fabricación, demostrando un compromiso práctico con la reducción de la demanda de recursos hídricos potables. La investigación establece un protocolo simple, accesible y validado por la literatura (aditivos, hornificación), ofreciendo una contribución directa a la conciencia de la Economía Circular.

REFERENCIAS

Anisa, A., & Ariffin, A. (2022). Effect of recycled fibers on the properties of nanofiber

- reinforced paperboard. *Journal of Engineering Science and Technology*, 17(1), 135–144.
- Ang, S., Ghosh, D., Haritos, V., & Batchelor, W. (2021). Recycling cellulose nanofibers from wood pulps provides drainage improvements for high strength sheets in papermaking. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127731.
- Awoyer, P. O., Olalusi, O. B., & Babagbale, D. P. (2021). Production of lightweight mortar using recycled waste papers and pulverized ceramics: Mechanical and microscale properties. *Journal of Building Engineering*, 39, 102233.
- Balaga, M., & Kumar, K. R. S. S. (2016). Integrated Flotation and Dissolved Air Flotation (DAF) for Recycling of Wastewater in Pulp and Paper Industry. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 6(4), 1324–1327.
- Bayatkashkoli, A., Ramazani, O., Keyani, S., Mansouri, H. R., & Madahi, N. K. (2018). Investigation on the production possibilities of high-pressure laminate from borax and recycled paper as a cleaner product. *Journal of Cleaner Production*, 185, 696–704.
- Campano, C., Merayo, N., Negro, C., & Blanco, Á. (2018). Low-fibrillated bacterial cellulose nanofibers as a sustainable additive to enhance recycled paper quality. *International Journal of Biological Macromolecules*, 114, 1077–1083.
- Counsell, T. A. M., & Allwood, J. M. (2009). Reducing the energy demand of office printing by toner-print removal. *Journal of Cleaner Production*, 17(18), 1656–1662.
- D. (2021). Rainwater treatment using an acrylic blanket as a filtering media. *Journal of Cleaner Production*, 303, 126964.
- Da Costa, P. C. L., de Azevedo, A. R. G., da Silva, F. C., do Carmo, D. d. F., & Cecchin, Dexter, M., Rickman, K., Pan, C.-H., Chang, C.-H., & Malhotra, R. (2019). Intense Pulsed Light unprinting for reducing life-cycle stages in recycling of coated printing paper. *Journal of Cleaner Production*, 232, 274–284.
- Hu, H., Zeng, J., Cheng, Z., Wang, X., Wang, B., Zeng, Z., & Chen, K. (2021). Cellulose nanofibrils (CNFs) produced by different mechanical methods to improve mechanical properties of recycled paper. *Carbohydrate Polymers*, 254, 117474.
- Kosel, J., Šuštaršič, M., Petkovšek, M., Zupanc, M., Sežun, M., & Dular, M. (2020). Application of (super)cavitation for the recycling of process waters in paper producing industry. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105002.
- Kumar, S., Gupta, M., & Kumar, J. (2020). Cleaner approach for recovery of paper and water from paper mill waste. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119932.
- Lee, C., Lee, E., Kim, J. Y., & Lee, H. (2013). Effect of starch and polyelectrolytes on paper properties and filler retention using recycled deinking sludge and old corrugated container pulp. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 28(4), 453–458.
- Marques, C., Ferreira, T. C., Gomes, M. T. S., & Simões, M. (2017). Efficient removal of microalgae by dissolved air flotation (DAF) for water treatment. *Water Research*, 120, 200–207.

Mirkovic, I. B., Majnaric, I., & Bolanca, Z. (2015). Ecological Sustainability and Waste Paper Recycling. *Procedia Engineering*, 100, 177–186.

Mofokeng, N. N., Madikizela, L. M., Tiggelman, I., & Chimuka, L. (2024). Chemical profiling of paper recycling grades using GC-MS and LC-MS: An exploration of contaminants and their possible sources. *Waste Management*, 189, 104576.

Naijian, F., Rudi, H., Resalati, H., & Jafari Torshizi, H. (2019). Application of bio-based modified kaolin clay engineered as papermaking additive for improving the properties of filled recycled papers. *Applied Clay Science*, 182, 105258.

Negaresh, M., Daryasafar, R., & Jafari, A. S. (2013). Manufacturing of low-density particleboard from waste paper and industrial wood waste. *Journal of Cleaner Production*, 54, 290–296.

Sousa, D., Furtado, M. F., R. G. B. de Oliveira, R. M. V., "Optimisation of flotation in recycling of digital printed papers with different pulping strategies," *Journal of Cleaner Production*, vol. 198, pp. 1179-1188, 2018.

Suthar, F., Sharma, R. S., & Sangwan, P. (2016). Integrated waste management system for deinking sludge and old corrugated container (OCC) paper using sequential treatment of ozone and enzyme for improvement of properties. *Journal of Cleaner Production*, 138, 195–204.

Tsatssis, T., Papachristos, D., Valta, K., Vlyssides, A., & Economides, D. (2017). Enzymatic deinking for recycling of office waste paper. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(2), 1744–1753.

Utlu, T., & Khan, M. H. H. (2013). Recycling of Waste Papers in Manufacture of Environmentally Friendly Bricks. *Journal of Cleaner Production*, 54, 290–296.

Wang, X., Hou, M., & Zeng, J. (2017). Enhanced recycling of waste paper by enzymatic treatment and froth flotation. *Journal of Cleaner Production*, 142, 387–394.

Zhang, C., Bussini, D., Hortal, M., Elegir, G., Mendes, J., & Jordá Beneyto, M. (2016). PLA coated paper containing active inorganic nanoparticles: Material characterization and fate of nanoparticles in the paper recycling process. *Waste Management*, 51, 317–324.

© Los autores. Este artículo se publica en Prisma ODS bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Esto permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, incluidos fines comerciales, siempre que se otorgue la atribución adecuada a los autores y a la fuente original.



 : <https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i1.146>

Cómo citar este artículo (APA 7^a edición):

Muñoz Linares, L. V. ., Muñoz Linares, V. M. ., & Cuate Gomez, D. H. . (2026). Economía Circular en el Reciclaje de Papel, Obteniendo Materiales de Valor Agregado. *Prisma ODS: Revista Multidisciplinaria Sobre Desarrollo Sostenible*, 5(1), 81-97. <https://doi.org/10.65011/prismaods.v5.i1.146>