Valorization of Sugarcane (*Saccharum officinarum*) Agro-Industrial Waste for the Production of Biodegradable Paper in the District of Magdalena, Cajamarca, 2026.

Alcántara-Chavarri Franco, Estudiante Ing. Industrial[1], Taggart-Alvarez Kira, Estudiante Ing. Industrial[2],
1-2 Universidad Privada del Norte, Perú, n00375561@upn.pe, n00362120@upn.pe

Abstract– *This study evaluated the technical feasibility of using sugarcane bagasse (Saccharum officinarum) to produce potentially biodegradable paper within a circular economy approach. An applied study with an exploratory-experimental design was conducted through three successive trials, using approximately 50 g of dry bagasse per trial. The procedure included washing, drying, grinding, cooking, acid treatment with 5% HCl, alkaline treatment with 0.5 M NaOH, bleaching with 2–3% NaClO, sheet formation, pressing, and drying. The results were analyzed descriptively considering color, texture, flexibility, opacity, uniformity, folding behavior, and writing performance. The trials showed progressive improvements, with the third trial producing firmer and more uniform sheets suitable for writing and erasing, although they retained a beige tone, opacity, and limited flexibility. It was concluded that sugarcane bagasse shows preliminary technical feasibility as a raw material for paper production. Future research should include mechanical characterization, biodegradability testing, and the evaluation of chemical alternatives with lower environmental impact.*

Keywords--sugarcane bagasse, biodegradable paper, cellulose, agro-industrial waste, circular economy.

Aprovechamiento de residuos agroindustriales de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) para la producción de papel biodegradable en el distrito de Magdalena, Cajamarca 2026.

Alcántara-Chavarri Franco, Estudiante Ing. Industrial[1], Taggart-Alvarez Kira, Estudiante Ing. Industrial[2],
1-2 Universidad Privada del Norte, Perú, n00375561@upn.pe, n00362120@upn.pe

Resumen–
Esta investigación evaluó la viabilidad técnica del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar (Saccharum officinarum) para elaborar papel potencialmente biodegradable bajo un enfoque de economía circular. Se desarrolló un estudio aplicado con diseño experimental-exploratorio mediante tres ensayos sucesivos, empleando aproximadamente 50 g de bagazo seco por ensayo. El procedimiento comprendió lavado, secado, trituración, cocción, tratamiento ácido con HCl al 5 %, tratamiento alcalino con NaOH 0,5 M, blanqueamiento con NaClO al 2–3 %, formación de hojas, prensado y secado. Los resultados se analizaron descriptivamente considerando coloración, textura, flexibilidad, opacidad, uniformidad, comportamiento al doblado y facilidad de escritura. Los ensayos mostraron mejoras progresivas, obteniéndose en la tercera prueba hojas más firmes y uniformes, aptas para escritura y borrado, aunque con tonalidad beige, opacidad y flexibilidad limitada. Se concluye que el bagazo presenta viabilidad técnica preliminar como materia prima para elaborar papel. Futuras investigaciones deberán incorporar caracterización mecánica, ensayos de biodegradabilidad y evaluación de alternativas químicas de menor impacto ambiental.

Palabras clave-- Bagazo de caña, papel biodegradable, residuos agroindustriales, extracción de celulosa, desarrollo sostenible.

I. INTRODUCCIÓN

El incremento de residuos agroindustriales ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para su aprovechamiento. Actualmente, grandes cantidades de estos residuos son desechadas o aprovechadas de forma limitada, pese a contener componentes que pueden ser valorizados en diferentes procesos productivos [1]. Entre ellos destaca el bagazo de caña de azúcar, residuo fibroso caracterizado por su contenido de celulosa y su potencial como materia prima para la obtención de materiales de base celulósica [2].

Diversas investigaciones han demostrado que los residuos lignocelulósicos pueden constituir fuentes alternativas de fibras para la elaboración de papel [3]. Asimismo, su valorización permite transformar residuos agroindustriales en recursos útiles y se relaciona con los principios de economía circular y aprovechamiento sostenible de la biomasa [1].

La caña de azúcar (Saccharum officinarum) destaca por su rápida producción de biomasa y por generar bagazo durante el proceso de extracción del jugo. Estudios realizados en el Perú reportan que el bagazo industrial contiene 42,91 % de celulosa, 27,92 % de hemicelulosa y 9,74 % de lignina, mientras que el bagazo artesanal presenta 29,80 %, 20,61 % y 5,70 %, respectivamente [4]. Esta composición evidencia su potencial como fuente de fibras celulósicas para diferentes aplicaciones.

Los procesos de deslignificación y blanqueamiento permiten reducir componentes no celulósicos y mejorar las características de la fracción celulósica obtenida del bagazo de caña. Estos tratamientos favorecen su posterior aprovechamiento para la elaboración de productos de base celulósica, entre ellos el papel [5].

En el Perú, el procesamiento industrial y artesanal de la caña de azúcar genera bagazo como residuo fibroso después de la molienda y extracción del jugo [4]. Esta situación también se presenta en Cajamarca, particularmente en el distrito de Magdalena, donde la producción artesanal de derivados de la caña forma parte del contexto productivo local [6]. En este escenario, el bagazo presenta potencial para ser valorizado como materia prima en la elaboración de materiales de base celulósica.

Por ello, el presente estudio propone el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar para la elaboración de papel potencialmente biodegradable, promoviendo la reutilización de residuos agroindustriales bajo un enfoque de economía circular. Asimismo, la propuesta se relaciona con los ODS 12, 13 y 15 al fomentar la producción responsable, el aprovechamiento sostenible de los recursos y la reducción de impactos ambientales

A nivel internacional, la industria papelera utiliza principalmente fibras de origen vegetal, lo que ha impulsado la búsqueda de fuentes no madereras y residuos agroindustriales como materias primas alternativas para la elaboración de papel [3]. Entre estas alternativas destaca el bagazo de caña de azúcar por su disponibilidad y contenido de celulosa [2]. Una ventaja de la caña frente a las fuentes forestales es su rápida generación de biomasa, ya que, dependiendo de la variedad y las condiciones de cultivo, puede alcanzar periodos de cosecha alrededor de los 10 a 12 meses, mientras que las especies forestales destinadas a la obtención de madera requieren ciclos de crecimiento considerablemente mayores.

En el contexto nacional, el Perú mantiene una importante producción de caña de azúcar dentro del sector agroindustrial. Según estadísticas del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, en 2021 la producción nacional de caña para azúcar alcanzó aproximadamente 9,83 millones de toneladas [7],

generando bagazo como subproducto durante su procesamiento. Aunque este residuo puede ser aprovechado como combustible, abono y materia prima para diferentes aplicaciones industriales, aún presenta oportunidades de valorización debido a su contenido de celulosa y potencial para la elaboración de productos de base celulósica, entre ellos el papel [2]. En este sentido, el aprovechamiento de residuos agroindustriales constituye una alternativa para reducir la dependencia de materias primas maderables y promover su valorización bajo principios de economía circular [1].

A nivel regional, en Cajamarca el cultivo y procesamiento de la caña de azúcar forma parte de las actividades productivas tradicionales de algunas zonas. En el distrito de Magdalena destaca la elaboración de derivados como miel de caña, chancaca y aguardiente mediante el uso de trapiches [6]. Estas actividades generan residuos derivados del procesamiento de la caña, entre ellos el bagazo, cuyo contenido lignocelulósico permite considerar su valorización como materia prima para productos de base celulósica [2].

Frente a esta problemática, el bagazo de caña se presenta como una alternativa para la elaboración de papel debido a su contenido de celulosa y a sus propiedades fisicoquímicas favorables para su aprovechamiento industrial [2]. Este residuo representa entre el 26 % y 29 % del peso de la caña molida y constituye uno de los principales subproductos generados durante su procesamiento [4]. Asimismo, investigaciones realizadas en el Perú evidencian que el bagazo contiene celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que sustentan su potencial como materia prima para diferentes aplicaciones de base celulósica [4]. En este contexto, el presente proyecto propone el aprovechamiento del bagazo de caña generado en el distrito de Magdalena, Cajamarca, mediante la extracción de celulosa para la elaboración de papel, promoviendo la valorización de residuos agroindustriales bajo un enfoque de sostenibilidad y economía circular.

El presente estudio tiene como objetivo general desarrollar un papel potencialmente biodegradable a partir del bagazo de caña de azúcar generado en el distrito de Magdalena, mediante la extracción de celulosa y el aprovechamiento sostenible de este residuo agroindustrial. Para ello, se plantea diseñar el proceso de obtención del papel mediante el tratamiento y extracción de celulosa, así como optimizar las condiciones de producción mediante tratamientos fisicoquímicos y alternativas de menor impacto ambiental que permitan mejorar las propiedades del producto obtenido. Finalmente, se busca evaluar la viabilidad del bagazo de caña como materia prima para la producción del papel, bajo un enfoque de economía circular y sostenibilidad ambiental.

A diferencia de investigaciones previas que han demostrado la posibilidad de obtener papel a partir del bagazo de caña [9], la innovación del presente estudio se orienta a la adaptación y optimización progresiva del proceso en el contexto productivo de Magdalena, Cajamarca. La propuesta no solo busca valorizar un residuo agroindustrial disponible localmente, sino también identificar oportunidades para sustituir progresivamente reactivos convencionales empleados en el tratamiento de las fibras por alternativas de menor impacto ambiental, como el ácido cítrico, el peróxido de hidrógeno y el carbonato de sodio. Asimismo, se plantea como línea de validación posterior la evaluación experimental de la biodegradabilidad del papel obtenido. De esta manera, el aporte del estudio integra la valorización local del bagazo, la búsqueda de un proceso químico de menor impacto y el desarrollo preliminar de un material con potencial biodegradable bajo un enfoque de economía circular.

- *Residuos agroindustriales*

Los residuos agroindustriales son subproductos generados durante el procesamiento de materias primas agrícolas que pueden ser aprovechados como materia prima para la obtención de productos de valor agregado **[8]**. Su valorización permite reducir la generación de residuos y favorecer modelos de producción más sostenibles [1]. Entre estos residuos, el bagazo de caña destaca como una fuente lignocelulósica con diversas posibilidades de aprovechamiento industrial [2].

- *La caña de azúcar (Saccharum officinarum)*

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una gramínea tropical de la familia Poaceae, cultivada principalmente para la obtención de azúcar y otros derivados. Durante su procesamiento se genera bagazo como uno de los principales residuos fibrosos de la agroindustria azucarera [8]. En el Perú, la producción de caña para azúcar alcanzó aproximadamente 9,83 millones de toneladas en 2021 [7]. Durante la extracción del jugo se genera el bagazo, residuo fibroso que representa aproximadamente entre el 26 % y 29 % del peso de la caña procesada [4]. Debido a sus características lignocelulósicas, este subproducto presenta diversas posibilidades de aprovechamiento industrial [2].

- *Composición lignocelulósica del bagazo de caña*

Los materiales lignocelulósicos están constituidos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes estructurales de la biomasa vegetal [4]. En el bagazo de caña, su proporción puede variar según la especie, las condiciones de cultivo y el procesamiento; se han reportado rangos de 35–54 % de celulosa, 16–35 % de hemicelulosa y 14–26 % de lignina [4]. Esta composición, particularmente su contenido de celulosa, favorece el aprovechamiento del bagazo como fuente de fibra para aplicaciones papeleras [2].

- *Celulosa*

La celulosa es un polisacárido natural constituido por cadenas lineales de unidades de glucosa unidas mediante enlaces β-(1→4), cuya estructura le confiere propiedades de interés para diversas aplicaciones industriales [2]. En el bagazo de caña, la celulosa se encuentra asociada con hemicelulosa y lignina, por lo que su recuperación requiere tratamientos que permitan reducir o remover estos componentes no celulósicos [5]. Debido a su contenido de celulosa y características fibrosas,

el bagazo constituye una materia prima con potencial para la obtención de fibras destinadas a la elaboración de papel y otros productos de base celulósica [2].

- *Tratamiento alcalino*

El tratamiento alcalino constituye una etapa utilizada en el procesamiento del bagazo de caña para favorecer la obtención de fibras celulósicas. Entre los agentes empleados se encuentra el hidróxido de sodio (NaOH), utilizado en procesos de extracción de celulosa destinada a la elaboración de papel a partir de bagazo de caña **[9]**.

- *Blanqueamiento*

El blanqueamiento constituye una etapa de purificación de la fracción celulósica y permite obtener fibras con mayor blancura y pureza [4]. En el tratamiento del bagazo se han empleado diferentes agentes de blanqueamiento, entre ellos el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) [5].

- *Producción de papel biodegradable*

La producción de papel a partir del bagazo de caña comprende el acondicionamiento de la materia prima, la extracción de celulosa y la formación de la hoja. Durante el proceso, el bagazo puede someterse a limpieza, secado, reducción de tamaño y tratamiento químico para obtener la pulpa celulósica [9]. Posteriormente, las fibras son acondicionadas, moldeadas, prensadas y secadas hasta obtener el papel. Este aprovechamiento permite transformar el bagazo en una materia prima fibrosa para la elaboración de productos papeleros [10].

- *Impacto ambiental de la industria papelera tradicional*

La producción convencional de papel presenta una elevada dependencia de materias primas de origen forestal, lo que ha impulsado la búsqueda de fibras vegetales alternativas para la elaboración de papel [11]. En este contexto, los residuos agroindustriales constituyen una fuente potencial de fibras que puede ser aprovechada para diversificar las materias primas utilizadas por la industria papelera [9].

- *Desarrollo sostenible y economía circular*

El desarrollo sostenible busca satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias. En este marco, la economía circular promueve el aprovechamiento eficiente de los recursos y la valorización de residuos para reducir su generación [1]. La utilización del bagazo de caña para producir papel se alinea con este enfoque al transformar un residuo agroindustrial en un producto de valor agregado. Asimismo, la propuesta se relaciona con los ODS 12 (Producción y consumo responsables), ODS 13 (Acción por el clima) y ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres), debido a su orientación hacia el aprovechamiento de residuos, el uso de materias primas renovables y la búsqueda de alternativas a recursos convencionales. La valorización del bagazo también puede favorecer alternativas productivas en zonas agrícolas como Cajamarca, mediante la innovación y el aprovechamiento de recursos disponibles.

II. METODOLOGÍA

La investigación se orientó al aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar como materia prima para la elaboración de papel. Este residuo lignocelulósico fue acondicionado y tratado para obtener fibras destinadas a la formación de papel, como se ha demostrado en estudios experimentales de valorización del bagazo [9].

La materia prima considerada en el estudio corresponde al bagazo generado durante la elaboración artesanal de derivados de caña de azúcar en el distrito de Magdalena, Cajamarca, actividad productiva presente en esta zona [6]. A partir de este residuo se planteó un proceso experimental que comprende su acondicionamiento, tratamiento para la obtención de fibras celulósicas y posterior formación del papel, con el propósito de evaluar su aprovechamiento como materia prima alternativa.

Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica consideró estudios sobre la obtención de papel a partir del bagazo de caña [9], métodos de extracción y purificación de celulosa [5], elaboración de papel a partir de fibras no convencionales [3] y caracterización fisicoquímica y composición lignocelulósica del bagazo de caña [4]. Estas investigaciones permitieron establecer los fundamentos técnicos para el planteamiento del proceso experimental desarrollado en el estudio.

Diseño de la investigación

La presente investigación se define como un estudio aplicado y experimental-exploratorio. Es aplicado porque busca resolver una problemática ambiental local mediante la valorización de un residuo agroindustrial. Es experimental-exploratorio debido a que se manipulan variables fisicoquímicas en un proceso artesanal adaptado en tres ensayos sucesivos para identificar la viabilidad técnica de la obtención de hojas de papel, sin buscar aún un modelo factorial definitivo

Población y muestra

La población de estudio estuvo conformada por la caña de azúcar recolectada en la Hacienda La Viña, ubicada entre los kilómetros 102 y 112 de la carretera Cajamarca–Chilete, en el distrito de Magdalena, Cajamarca. La materia prima utilizada estuvo constituida por 2 kg de caña de azúcar, después de la extracción del jugo y el retiro de la corteza externa se obtuvo el bagazo, el cual fue lavado y secado para su acondicionamiento. Del bagazo seco disponible se seleccionaron aproximadamente 50 g para cada ensayo experimental.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Técnicas

- Observación experimental: permitió registrar los cambios observados durante las diferentes etapas de elaboración del papel a partir del bagazo de caña de azúcar.
- Registro de datos del proceso: permitió documentar las cantidades de materia prima y reactivos utilizados, así como los tiempos registrados durante los ensayos experimentales.
- Evaluación comparativa: permitió comparar los tres ensayos considerando características observables del papel, como color, textura, flexibilidad, opacidad, uniformidad y comportamiento al doblado.

Instrumentos

- Balanza digital para medición de masa.
- Horno de secado para control de temperatura.
- Olla a presión para tratamiento térmico.
- Recipientes de laboratorio.
- Moldes artesanales para formación del papel.
- Prensa manual para compactación de fibras.
- Licuadora o triturador mecánico
- Extractor de jugo
- Tela absorbente
- Tamiz metálico

Reactivos químicos

- Hidróxido de sodio (NaOH).
- Hipoclorito de sodio (NaClO 2-3%).
- Ácido clorhídrico diluido (HCl 5%).
- Agua destilada.

TABLA I
REACTIVOS Y CANTIDADES EMPLEADAS EN EL PROCESO EXPERIMENTAL

ETAPA	REACTIVO	VOLUMEN	OBJETIVO
Lavado	Agua destilada	3 L	Eliminó suciedad y neutralizó pH
Cocción	Agua	1 L	Ablandó fibras
Tratamiento Ácido	HCL diluido al 5%	250 mL	Removió minerales
Tratamiento Alcalino	NaOH	250 mL	Eliminó lignina
Blanqueamiento	NaClO (2-3%)	150 mL	Aclaró fibras

Procedimiento experimental

Primero, se retiró la cáscara de la caña y posteriormente se realizó la extracción del jugo para obtener el bagazo. El material obtenido se lavó con abundante agua para eliminar impurezas y residuos solubles, y se secó a temperatura ambiente durante 24 horas. Luego, se realizó un secado en horno a 80 °C hasta alcanzar peso constante. Finalmente, el bagazo seco fue triturado mecánicamente para reducir su tamaño y facilitar los tratamientos posteriores. El acondicionamiento de la materia prima se realizó tomando como referencia procedimientos de preparación de bagazo de caña reportados en estudios de extracción de celulosa [12].



Fig. 1 Flujograma del proceso de obtención de pulpa de bagazo de caña.

a. Eliminación de sólidos solubles

Se tomó aproximadamente 50 g de bagazo seco y se mezcló con agua. La mezcla fue sometida a cocción en olla a presión durante 1 hora, con el objetivo de remover compuestos solubles y favorecer el ablandamiento de la estructura lignocelulósica del material. Posteriormente, la muestra fue filtrada y secada a 75 °C hasta alcanzar peso constante.

b. Tratamiento ácido:

El bagazo tratado fue sometido a lavado químico utilizando ácido clorhídrico diluido (HCl), con la finalidad de remover impurezas minerales y favorecer la separación de componentes no celulósicos. El tratamiento se realizó durante 4 horas bajo agitación moderada.

Luego, el material fue filtrado y lavado con agua destilada hasta neutralizar el pH.

c. Tratamiento alcalino

La extracción de celulosa se realizó mediante un tratamiento alcalino con hidróxido de sodio (NaOH), utilizado para favorecer la remoción de lignina y hemicelulosa presentes en el bagazo de caña [2]. La muestra fue mezclada con una solución de NaOH a 0.5 M y calentada durante 1 hora a baño maría, con agitación constante. Este tratamiento permitió remover parcialmente los componentes no celulósicos y favorecer la obtención de las fibras de celulosa. Posteriormente, el material fue lavado repetidamente con agua destilada hasta eliminar los residuos alcalinos. Finalmente, se obtuvo una pulpa rica en fibras celulósicas que fue utilizada en las etapas posteriores de elaboración del papel.

d. Blanqueamiento

Con el objetivo de mejorar la apariencia y coloración de la pulpa, se aplicó un tratamiento de blanqueamiento utilizando hipoclorito de sodio (NaClO) durante 90 minutos. Posteriormente, la pulpa fue lavada con abundante agua hasta alcanzar un pH neutro y se dejó secar parcialmente a temperatura ambiente.

e. Elaboración del papel

La fabricación del papel se realizó mediante el método artesanal de papel de tina, con adaptaciones orientadas a mejorar la uniformidad y resistencia del papel. La pulpa celulósica fue dispersada en agua dentro de una tina, luego, mediante un molde con malla, se formó láminas delgadas que fueron prensadas manualmente para eliminar exceso de agua. Las hojas obtenidas fueron colocadas sobre tela absorbente y

sometidas a secado a temperatura ambiente durante 48 horas. Finalmente, el papel fue prensado nuevamente para mejorar la lisura superficial y propiedades físicas [3].

Optimización del proceso

Se buscó optimizar el proceso mediante la reducción del uso de reactivos químicos, la disminución de los tiempos de secado, la mejora de la textura y resistencia del papel, la obtención de un color más uniforme y el incremento del rendimiento de la celulosa extraída.

Evaluación del papel obtenido

El papel obtenido fue evaluado considerando propiedades físicas y funcionales como textura, flexibilidad, opacidad, resistencia al doblado y facilidad de escritura. La evaluación de propiedades físicas y mecánicas constituye un criterio relevante para determinar la calidad del papel elaborado a partir de fibras de bagazo de caña [13]. Asimismo, se buscó reducir el impacto ambiental del proceso mediante la disminución del uso de reactivos químicos y agentes blanqueadores, el máximo aprovechamiento de las fibras del bagazo, el secado a temperatura ambiente y la reutilización parcial del agua empleada durante los lavados experimentales. Estas medidas fueron evaluadas juntamente con las propiedades del papel obtenido, con el propósito de identificar condiciones que permitan mantener características adecuadas de textura, flexibilidad y resistencia, reduciendo al mismo tiempo el consumo de recursos durante el proceso.

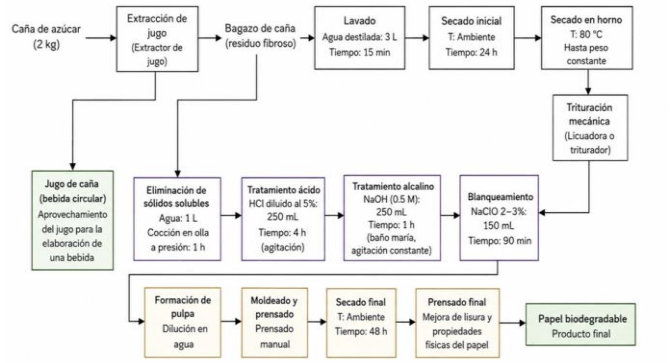


Fig. 2 Diagrama de bloques del proceso para la elaboración de papel.

Análisis de datos

Los resultados obtenidos se analizaron mediante procedimientos descriptivos y comparativos entre los tres ensayos experimentales. Se consideraron las condiciones de procesamiento y las características observables y funcionales de las hojas obtenidas, como color, textura, flexibilidad, opacidad, uniformidad, comportamiento al doblado y facilidad de escritura. Los resultados fueron comparados con investigaciones previas relacionadas con la elaboración de papel a partir de residuos lignocelulósicos.

III. RESULTADOS

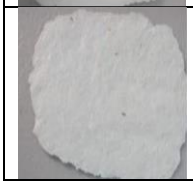
Se realizaron tres pruebas orientadas a evaluar el comportamiento del bagazo de caña de azúcar durante la extracción de celulosa y la formación de papel. Los ensayos permitieron identificar dificultades en el secado, prensado, coloración, flexibilidad y uniformidad de las hojas obtenidas.

Primera prueba: Evaluación del peso del bagazo de caña para analizar el proceso de extracción de celulosa

En la primera prueba se buscó evaluar el comportamiento del bagazo de caña durante las etapas iniciales de extracción de celulosa. Para ello, se trabajó con fragmentos de bagazo que no fueron triturados completamente, con la finalidad de observar si podían conservar mejor su estructura fibrosa durante el proceso. Sin embargo, se identificó que el tamaño de los fragmentos influyó negativamente en el desarrollo del procedimiento. Al ser trozos demasiado grandes, retuvieron mayor cantidad de humedad en su interior, lo que provocó tiempos de secado más prolongados. Además, esta condición dificultó que los reactivos actuaran de manera uniforme sobre toda la muestra.

Durante el tratamiento alcalino con NaOH, se produjo una separación excesiva de las fibras, obteniéndose una pulpa demasiado fina y difícil de manipular. Esto complicó el filtrado, el prensado y el moldeado de la hoja, ya que la celulosa no formó una red fibrosa suficientemente compacta y resistente. Como consecuencia, el papel obtenido presentó fragilidad, baja flexibilidad y poca uniformidad en su estructura.

TABLA II.
CARÁCTERISTICAS Y RESULTADOS DE LA PRIMERA PRUEBA

PAPEL OBTENIDO	CARACTERÍSTICAS
	Fue sometida solo a cocción y prensado. Presentó baja resistencia, color beige claro y textura suave. A contraluz se observaron pequeños fragmentos de fibra.
	Pasó por tratamiento alcalino con NaOH y blanqueamiento. Se obtuvo una hoja más uniforme, suave y flexible, con menor presencia de fibras visibles y tono blanco crema.
	Solo recibió blanqueamiento, sin tratamiento alcalino. Presentó mayor rigidez, superficie suave y pequeñas partículas de bagazo visibles, con coloración blanco-crema.

Segunda prueba: Evaluación del uso de hidróxido de sodio (NaOH) en la extracción de celulosa y mejora del proceso.

En esta segunda prueba se observó que, al secar la muestra después del tratamiento alcalino y luego someterla al blanqueamiento, el papel obtenido no alcanzó un color blanco brillante, sino que mantuvo una tonalidad beige clara. Una situación similar ocurrió con el tratamiento con HCl, ya que el color final tampoco fue completamente blanco. Además, los tiempos de secado continuaron siendo prolongados; sin embargo, estos disminuyeron en comparación con la primera prueba. Esto podría deberse a que durante las etapas de filtrado y prensado no se aplicó la fuerza suficiente para retirar adecuadamente el exceso de humedad de la pulpa

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DE LOS DOS MÉTODOS EMPLEADOS EN LA OBTENCIÓN DEL PAPEL

PAPEL OBTENIDO	CARACTERÍSTICAS
	La muestra fue sometida al tratamiento alcalino. La hoja obtenida presentó textura tersa y un grosor ligeramente mayor, debido a que no se aplicó suficiente presión durante el prensado. Su color fue beige claro y no se fracturó con facilidad.
	En esta muestra se omitió el tratamiento alcalino. La hoja presentó una textura más tersa y mayor facilidad de moldeado en comparación con la primera muestra. Además, fue más delgada y mostró pocos fragmentos de bagazo a contraluz, con una tonalidad beige clara.

Tercera prueba: Reducción del uso de reactivos químicos y disminución de los tiempos de secado

En esta etapa se observó una mejora en las características del papel obtenido, el cual presentó una textura firme y uniforme, además de ser adecuado para la escritura y el borrado. Al examinarlo a contraluz, se evidenció una apariencia opaca y una flexibilidad limitada. Asimismo, se apreció una coloración ligeramente beige; esto se atribuye a que, pese a la aplicación del agente blanqueador, la exposición al ambiente favoreció un proceso de oxidación que dio lugar a una tonalidad crema en la superficie del papel.


Fig. 3. Resultados de la tercera prueba.

Análisis general de los resultados

Los resultados muestran que el bagazo de caña de azúcar constituye una materia prima viable para la elaboración de papel, debido a su contenido de celulosa y a su capacidad para formar pulpa papelera. Sin embargo, el proceso requiere controlar variables como el tamaño de fibra, concentración de reactivos, tiempo de secado, presión de prensado y espesor de la hoja. Asimismo, se considera pertinente continuar la investigación incorporando alternativas más ecológicas, como el uso de ácido cítrico en reemplazo del HCl y peróxido de hidrógeno o agua oxigenada en reemplazo del hipoclorito de sodio. Estas alternativas podrían reducir el impacto ambiental del proceso, manteniendo la función de limpieza, deslignificación parcial y blanqueamiento de las fibras.

TABLA IV
ALTERNATIVAS DE REACTIVOS ECOLÓGICOS PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE PAPEL

ALTERNATIVA ECOLÓGICA	ETAPA	REACTIVO	OBJETIVO
Ácido cítrico o vinagre blanco	Tratamiento ácido	HCl	Remover minerales
Carbonato de sodio	Tratamiento alcalino	NaOH	Eliminar lignina
Peróxido de hidrógeno	Blanqueamiento	Hipoclorito de sodio	Aclarar fibras

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos evidencian que el bagazo de caña de azúcar constituye una materia prima viable para la elaboración de papel potencialmente biodegradable, debido a su capacidad para formar una pulpa celulósica apta para la producción de hojas. Durante los tres ensayos realizados se observaron mejoras progresivas en la textura, uniformidad y facilidad de escritura del papel. Estos resultados coinciden con los estudios realizados, donde se obtuvieron celulosa a partir de bagazo de caña y la utilizaron posteriormente para la elaboración de papel. Asimismo, se estudió el aprovechamiento del bagazo como materia prima para la producción de papel de impresión y escritura, lo que respalda su potencial para aplicaciones papeleras [9].

Asimismo, se observó que el tamaño de las fibras, la distribución de la pulpa, el espesor de la hoja y la presión aplicada durante el prensado influyeron en la resistencia, flexibilidad y uniformidad del producto final. En la primera prueba, los fragmentos grandes retuvieron mayor humedad y dificultaron la acción homogénea de los reactivos, mientras que una pulpa excesivamente fina generó hojas frágiles y difíciles de manipular. Estos resultados coinciden con los autores, quienes señalan que la calidad del papel artesanal depende de la distribución uniforme de las fibras y del control del espesor durante la formación de las hojas [3].

Por otro lado, las muestras conservaron una tonalidad beige-crema incluso después del proceso de blanqueamiento. Este comportamiento puede relacionarse con la presencia

residual de lignina y con la oxidación natural de las fibras durante el secado y la exposición al ambiente, factores que afectan la coloración del papel producido a partir de biomasa lignocelulósica [14]. Además, el bagazo de caña presenta aproximadamente entre 41 % y 50 % de celulosa, entre 20 % y 37 % de hemicelulosa y entre 18 % y 25 % de lignina, composición que explica tanto su potencial papelero como la dificultad para obtener un color completamente blanco [15].

La evaluación realizada en el presente estudio fue principalmente cualitativa, considerando características observables y funcionales como textura, uniformidad, coloración, flexibilidad y facilidad de escritura. En investigaciones previas sobre papel artesanal elaborado con bagazo de caña se ha complementado este tipo de evaluación mediante mediciones cuantitativas de gramaje, pH, espesor, volumen específico y contenido de humedad [14]. En dicho estudio, las hojas elaboradas exclusivamente con fibras de bagazo presentaron un gramaje de 140 g/m², un pH de 7,5 y un espesor de 0,30 mm [14]. Estos valores no son directamente extrapolables al papel obtenido en la presente investigación, debido a las diferencias en las condiciones de procesamiento y formulación; sin embargo, constituyen una referencia para establecer los parámetros que deberán evaluarse cuantitativamente en futuras etapas de caracterización y optimización del material.

En relación con los reactivos empleados, el hidróxido de sodio favoreció la separación de las fibras y la eliminación parcial de lignina y hemicelulosa, mientras que el ácido clorhídrico permitió remover impurezas minerales y el hipoclorito de sodio mejoró parcialmente la coloración de la pulpa. Sin embargo, el uso de estos compuestos debe controlarse debido a su posible impacto ambiental y a la generación de residuos químicos durante el procesamiento [14].

Por ello, se recomienda que futuras investigaciones evalúen alternativas de menor impacto, como ácido cítrico o vinagre blanco para el tratamiento ácido, peróxido de hidrógeno para el blanqueamiento y carbonato de sodio como sustituto parcial del hidróxido de sodio. Estas propuestas deberán ser comprobadas experimentalmente, comparando su efecto sobre el rendimiento de celulosa, la resistencia, el color, la flexibilidad y el tiempo de secado. El desarrollo de procesos más limpios contribuiría al aprovechamiento sostenible del bagazo y al fortalecimiento de un modelo de economía circular [13].

El bagazo de caña constituye una fuente lignocelulósica con potencial para el desarrollo de materiales biodegradables, característica que ha sido reportada en investigaciones que emplean fibras y derivados celulósicos obtenidos de este residuo agroindustrial. Sin embargo, en el presente estudio no se realizó un ensayo específico de biodegradación del papel obtenido. Por ello, futuras investigaciones deberán incorporar ensayos de biodegradabilidad [16].

El presente estudio corresponde a una evaluación experimental-exploratoria preliminar de la viabilidad técnica del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar para la elaboración de papel. Los ensayos permitieron identificar cambios en características observables y funcionales como textura, uniformidad, coloración, flexibilidad y facilidad de escritura; sin embargo, no se realizaron pruebas mecánicas estandarizadas para determinar propiedades como la resistencia a la tracción. Asimismo, no se efectuó un ensayo experimental específico de biodegradabilidad del producto obtenido. Por ello, la caracterización mecánica y la evaluación estandarizada de la biodegradabilidad deberán incorporarse en futuras etapas de optimización y validación del proceso.

V. CONCLUSIONES

Se comprobó la viabilidad del aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar (Saccharum officinarum) como materia prima para la producción de papel, debido a su contenido de fibras celulósicas y a las características observadas en las hojas elaboradas. Asimismo, por su naturaleza celulósica, este residuo presenta potencial para el desarrollo de materiales biodegradables; sin embargo, la biodegradabilidad del papel obtenido no fue evaluada experimentalmente, por lo que deberá comprobarse mediante ensayos específicos en futuras investigaciones.

El proceso de extracción de celulosa y elaboración del papel permitió identificar que variables como el tamaño de las fibras, el grado de prensado, la concentración de reactivos y los tiempos de secado influyeron en la textura, resistencia, flexibilidad y uniformidad del producto final, por lo que su control resulta fundamental para mejorar la calidad del papel obtenido.

La optimización progresiva del procedimiento experimental permitió obtener hojas con mejores características físicas, tales como una textura más uniforme, mayor resistencia y una adecuada capacidad para la escritura y el borrado, evidenciando que es posible reducir los tiempos de secado y mejorar las propiedades del papel mediante ajustes en las condiciones de procesamiento.

Se concluye que la incorporación de alternativas de química verde, como el uso de ácido cítrico o vinagre blanco en sustitución del ácido clorhídrico, peróxido de hidrógeno en reemplazo del hipoclorito de sodio y carbonato de sodio como alternativa parcial al hidróxido de sodio, constituye una línea prometedora para futuras investigaciones, ya que podría disminuir el impacto ambiental del proceso y fortalecer el enfoque de economía circular y sostenibilidad asociado al aprovechamiento de residuos agroindustriales. Estas opciones deberán ser evaluadas experimentalmente para determinar su efecto sobre las propiedades del papel y el impacto ambiental del proceso, fortaleciendo así el enfoque de valorización de residuos agroindustriales y economía circular.

REFERENCIAS

[1] P. R. Yaashikaa, P. Senthil Kumar and S. Varjani, “Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review,” Bioresource Technology, vol. 343, Art. no. 126126, 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126126.

[2] M. A. Mahmud and F. R. Anannya, “Sugarcane bagasse—A source of cellulosic fiber for diverse applications,” Heliyon, vol. 7, no. 8, Art. no. e07771, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e07771.
[3] J. B. Benitez, M. Popo Amu, M. E. Vallejos and M. C. Area, “Calidad de papel artesanal a partir de fibras no convencionales de cinco especies colombianas,” Revista de Ciencia y Tecnología, vol. 31, no. 1, pp. 28–35, 2019.
[4] D. Resano, O. W. Guillen, F. D. R. Ubillús and J. L. Barranzuela, “Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción,” Información Tecnológica, vol. 33, no. 2, pp. 247–258, 2022, doi: 10.4067/S0718-07642022000200247.
[5] R. Freixo, F. Casanova, A. B. Ribeiro, C. F. Pereira, E. M. Costa, M. E. Pintado and Ó. L. Ramos, “Extraction methods and characterization of cellulose fractions from a sugarcane by-product for potential industry applications,” Industrial Crops and Products, vol. 197, Art. no. 116615, 2023, doi: 10.1016/j.indcrop.2023.116615.
[6] Gobierno Regional de Cajamarca, “Magdalena, paraíso de dulzura y sabor,” Gobierno Regional de Cajamarca, Cajamarca, Perú, Sep. 7, 2019. [Online]. Available: Gobierno Regional de Cajamarca.
[7] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Boletín Estadístico Mensual “El Agro en Cifras” – Diciembre 2021. Lima, Perú: MIDAGRI, 2022.
[8] N. Mejías-Brizuela, E. Orozco-Guillen and N. Galáan-Hernández, “Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México,” Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales, vol. 2, no. 6, pp. 27–41, 2016.
[9] K. Granados Suárez, C. Sánchez, J. R. Salazar Cano, D. R. Gómora Herrera and A. Santana Cruz, “Obtención de papel a partir de bagazo de caña para el aprovechamiento de residuos agroindustriales,” Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química, vol. 9, pp. 717–725, 2023.
[10] J. C. Fleck Gallas, “Estudio de factibilidad económica del uso del bagazo de caña de azúcar para la obtención de papel de impresión y escritura en el Paraguay,” tesis de maestría, Maestría en Tecnología de la Madera, Celulosa y Papel, Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Argentina, 2009
[11] L. M. Piguave Intriago, “Propuesta de fabricación de hojas de papel a partir de residuos de plátanos (Musa paradisiaca) como alternativa ecológica a la tala de árboles,” tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador, 2018.
[12] G. T. Melesse, F. G. Hone, and M. A. Mekonnen, “Extraction of cellulose from sugarcane bagasse: Optimization and characterization,” Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2022, Art. no. 1712207, 10 pp., 2022, doi: 10.1155/2022/1712207.
[13] N. Aguilar-Rivera, “Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel,” Ingeniería, Investigación y Tecnología, vol. 12, no. 2, pp. 189–197, 2011.
[14] K. Al-Sulaimani and P. B. Dwivedi, “Production of handmade papers from sugar cane bagasse and banana fibers in Oman,” International Journal of Students’ Research in Technology & Management, vol. 5, no. 3, pp. 16–20, 2017, doi: 10.18510/ijsrtm.2017.534.
[15] R. Sanjuán, J. Anzaldo, J. Vargas, J. Turrado, and R. Patt, “Morphological and chemical composition of pith and fibers from Mexican sugarcane bagasse,” Holz als Roh- und Werkstoff, vol. 59, no. 6, pp. 447–450, 2001, doi: 10.1007/s001070100236.
[16] N. Phinichka and S. Kaenthong, “Regenerated cellulose from high alpha cellulose pulp of steam-exploded sugarcane bagasse,” Journal of Materials Research and Technology, vol. 7, no. 1, pp. 55–65, 2018, doi: 10.1016/j.jmrt.2017.04.003.