

Sistema de producción sostenible de hojas ecológicas a base de (*Ficus benjamina* L.) y residuos forestales

RESUMEN: Independientemente al impacto ambiental asociado a la fabricación convencional de papel se evidencia el sustento de los alcances del proyecto al justificar la elaboración de papel ecológico a partir de desechos de papel y residuos forestales del árbol (*Ficus benjamina* L.), vinculada a los ODS 9, 12, 13 de la Agenda 2030. Refiere el diseño del proceso al proponer el cumplimiento de los alcances contemplados en la investigación.

El presente trabajo representa la vinculación del CIIDE y Cuerpo Académico ITESMIS-CA-12, Estudiantes del PMII del ITSM y Estudiantes de Ingeniería Industrial del ITSX. Se caracteriza la producción, incluyendo la formación de hojas con bastidores y prensas, contemplando secado controlado en cámaras térmicas, regulando la humedad y la temperatura para garantizar la calidad del producto final. Posteriormente el papel producido fue evaluado en términos de resistencia, flexibilidad, durabilidad y tiempo de degradación. Se sugieren trabajos futuros vinculados a líneas de investigación de ingeniería de procesos y análisis económico que fortalezcan la cadena de valor mejorando el índice actual de la rentabilidad donde la producción anual de hojas ecológicas alcanzó 306,000 unidades, estructuradas en 1020 lotes de 300 hojas, confirmando la viabilidad económica y la rentabilidad del proyecto.

PALABRAS CLAVE:

Papel ecológico, Residuos forestales, objetivo sostenible 09, cámaras térmicas.



Colaboración

María Alicia Rodríguez Lagunes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Xalapa; Denisse Ivvet Varela Pérez, Universidad Autónoma Chapingo; Ana Gabriela González Carrera, Universidad Euro Hispanoamericana; Blanca Yesenia Ortiz Galván; Saúl Santiago Cruz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 21 de marzo de 2025

Fecha de aceptación: 23 de mayo de 2025

ABSTRACT: Regardless of the environmental impact associated with conventional papermaking, the scope of the project is evident in its justification of the production of ecological paper from paper waste and forest residues from the tree (*Ficus benjamina* L.), linked to SDGs 9, 12, 13 of the 2030 Agenda. It refers to the design of the process when proposing compliance with the scopes contemplated in the research.

The present work represents the link between CIIDE and the ITESMIS-CA-12 Academic Body, ITSM PMII Students and ITSX Industrial Engineering Students. The production is characterized, including the formation of sheets with frames and presses, contemplating controlled drying in thermal chambers, regulating humidity and temperature to guarantee the quality of the final product. Subsequently, the paper produced was evaluated in terms of resistance, flexibility, durability and degradation time. Future work is suggested linked to lines of research into process engineering and economic analysis that strengthen the value chain by improving the current profitability index where the annual production of ecological sheets reached 306,000 units, structured in 1020 batches of 300 sheets, confirming the economic viability and profitability of the project.

KEYWORDS: Ecological paper, forest residues, sustainable objective 09, thermal chambers.

INTRODUCCIÓN

La deforestación se define como la remoción o pérdida permanente de cobertura arbórea en áreas forestales, generalmente provocada por actividades antrópicas como la expansión agrícola, la ganadería extensiva, el crecimiento urbano y la explotación forestal con fines comerciales tales como la obtención de madera y la producción de papel, lo cual conlleva una drástica alteración de los ecosistemas debido a la degradación de hábitats, la reducción de la biodiversidad, la perturbación del ciclo hidrológico y una mayor emisión de gases de efecto invernadero que en conjunto contribuyen significativamente al cambio climático global [1]. En México en el periodo 2001- 2023 se perdió en promedio 207,665 ha / año [2].

La celulosa, considerada la materia prima esencial en la fabricación de papel, se obtiene en un 90% a partir de fibras naturales provenientes de los árboles, mientras que el 10% restante proviene de otras fuentes vegetales como pastos, bambú y cáñamo. Para producir una sola tonelada de papel se requieren, en promedio, 2,400 kilogramos de madera, lo que equivale a la tala de aproximadamente 17 árboles, lo que pone en evidencia el elevado impacto ambiental que conlleva este proceso productivo [3]. En este contexto, la elaboración de productos ecológicos resulta fundamental, ya que se distinguen por sistemas de producción que respetan y protegen el medio ambiente en todas sus etapas mediante la integración de enfoques ecológicos y orgánicos en la fabricación de papel, lo cual promueve una industria limpia, segura y sostenible, considerando además que la obtención de un producto orgánico implica el uso exclusivo de sustancias y elementos naturales sin la incorporación de compuestos químicos [4].

De acuerdo con la CCA [5], los residuos orgánicos son materiales de origen biológico susceptibles de descomposición por microorganismos. En este marco, iniciativas internacionales como Green Growth de la OCDE y Bio Trade de la UNCTAD han sido promovidas en América Latina –particularmente en Colombia, Chile y Costa Rica– para fomentar el desarrollo tecnológico ambiental y el aprovechamiento sostenible de estos residuos [6].

La búsqueda de insumos alternativos para la producción de papel ha llevado a explorar el uso de fibras vegetales no leñosas como una solución viable y sostenible frente a la explotación forestal convencional [7]. Realizaron un estudio sobre diversas especies herbáceas y arbustivas no leñosas presentes en la provincia de Loja, Ecuador, concluyendo que materiales como hojas, tallos y cáscaras pueden ser aprovechados eficazmente en la elaboración de papel artesanal sin recurrir a procesos químicos agresivos. Dado que el papel es un producto

esencial para el ser humano, su alta demanda en el mercado lo convierte en un componente fundamental del desarrollo cotidiano [8]. Con la finalidad de satisfacer las necesidades básicas del ser humano y al mismo tiempo preservar el medio ambiente.

En coherencia con esta perspectiva, el presente estudio propone la utilización de residuos del árbol (*Ficus benjamina* L.), en combinación con papel reciclado, como base para la elaboración de papel ecológico, aportando una alternativa de bajo impacto ambiental, técnicamente viable y con potencial de replicabilidad en contextos comunitarios o educativos. De este modo, se plantea desarrollar hojas ecológicas a partir de dichos materiales, evaluando sus propiedades físico-mecánicas tales como: gramaje, espesor, textura, color, resistencia e índice de degradación, bajo condiciones controladas de laboratorio, con el propósito de validar su funcionalidad como sustituto sostenible del papel convencional bajo condiciones controladas de laboratorio, con el propósito de validar su funcionalidad como sustituto sostenible del papel convencional.

MATERIAL Y MÉTODOS

La alternativa de producción del papel ecológico se dividió en dos fases. La primera consistió en una investigación documental enfocada en los métodos y aplicaciones del papel reciclado, así como en los procesos de fabricación del papel. Aunque se justifica el uso de diferentes técnicas de solución como el uso de heurística se declina está en base a la indagación de incertidumbre dado que no aporta sustento en el diseño de hojas. De igual forma la técnica de TOPSIS, aunque es una técnica para considerar se desiste de su uso por requerir la selección de la mejor alternativa para producción de hojas [9]. En base a lo mencionado se decide el uso de DOE dado que nos garantiza una propuesta robusta de la producción de hojas.

La segunda fase fue una investigación descriptiva sobre el destino de las hojas desechadas en las oficinas del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa (ITSX) y del Instituto Tecnológico Superior de Miantla (ITSM). Con base en SERVQUAL se constituyó un cuestionario y una encuesta estructurada con preguntas cerradas de opción múltiple.

Primera fase

Dado a ello se llevaron a cabo las diversas etapas con base a la siguiente metodología [10], mismo que se utilizó para llevar a cabo el proceso de elaboración de las hojas a base de desechos de papel y residuos forestales [6].

En la Figura 1, se muestra el proceso de fabricación de una hoja ecológica utilizando desechos de papel y el fruto del (*Ficus benjamina* L.).

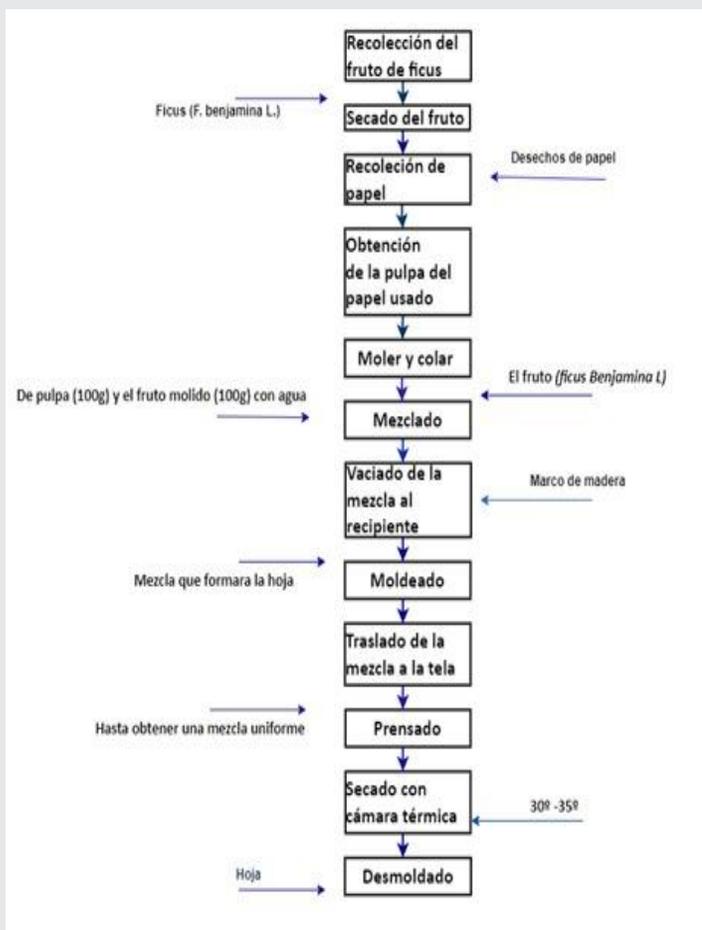


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de fabricación de hojas ecológicas.

Fuente: Elaboración propia.

Proceso de la producción de hojas de papel

Recolección del fruto: El primer paso que se llevó a cabo fue la recolección del fruto proveniente del árbol ficus (*Ficus benjamina L.*) que se encuentra en una de las jardineras del ITSX.

Secado del fruto: Posteriormente, el fruto se extendió en una superficie plana para que se secase a temperatura ambiente y directamente al sol. Este proceso duró aproximadamente entre 1 y 2 semanas.

Recolección de papel reciclado: Mientras se realizaba el proceso de secado del fruto, se hizo la recolección de hojas de papel desechadas por un grupo de estudiantes y personal del ITSX.

Obtención de la pulpa: Se pesaron 100 g de hojas desechadas, las cuales fueron cortadas en fragmentos pequeños y sumergidas en una bandeja con agua. Este proceso se mantuvo durante un intervalo de 1 a 2 días.

Molido y colación del fruto: Los 100 g del fruto fueron triturados en un mortero de piedra con el fin de obtener partículas más finas, lo que facilitó su integración y mejora en el proceso de mezcla con la pulpa de papel.

Mezcla de la pulpa y el fruto molido con agua: Después de moler los 100 g del fruto y obtener la pulpa de las hojas, ambos componentes se mezclaron con

6 litros de agua en una licuadora para conseguir una mezcla homogénea.

Vaciado de la mezcla al recipiente: Se realizó el vaciado de la mezcla en un recipiente.

Moldeado: Una vez obtenida una mezcla homogénea en el recipiente, se sumergió el marco en ella para capturar de manera uniforme la mezcla, lo que permitiría la formación de la hoja.

Traslado de la mezcla a tela: Luego de tener la mezcla necesaria en el marco, se colocó sobre ella un lienzo pequeño de tela para quitar el exceso de agua con ayuda de una esponja. Acto seguido, se dio la vuelta al marco de manera que la tela quedó debajo de este, sobre una superficie plana. Para terminar, se despegó el marco de la tela con la mezcla y se obtuvo la mezcla sobre la tela.

Prensado: Una vez que la mezcla se encontraba sobre el lienzo de tela, se colocó otro lienzo encima y se procedió a prensarla, lo que permitió que la mezcla se compactara de manera uniforme, garantizando una distribución homogénea en toda su superficie.

Secado: Después del prensado, se retiró el lienzo superior, dejando el lienzo con la mezcla sobre una superficie plana. El secado se realizó de dos formas: una mediante exposición directa al sol o a temperatura ambiente, y la otra, utilizando una cámara térmica de laboratorio.

Desmolde: Una vez que la mezcla alcanzó el nivel de secado adecuado, se procedió a desmoldar la hoja con cuidado.

Obtención del producto final: Tras desmoldar la hoja de la tela, se recortaron los excesos de material para ajustarla a la medida requerida de tamaño carta (21.59 x 27.94 cm). Al respecto la Figura 2, refleja las hojas obtenidas.



Figura 2. Hojas elaboradas a base de desechos de papel y residuos forestales (*ficus benjamín L.*)

Fuente: Elaboración propia.

Segunda fase:

El diseño descriptivo de esta investigación se clasificó en dos tipos: simple y comparativo. Se realizó una encuesta a estudiantes de diferentes niveles académicos para conocer su opinión sobre las diferencias entre las hojas ecológicas y las hojas convencionales.

Asimismo, la importancia del uso de este material redundaba en el uso de un diseño explicativo, ya que su objetivo principal fue experimentar con la elaboración de las hojas ecológicas y realizar pruebas con ellas, evaluando su uso por diferentes usuarios, como estudiantes de nivel básico, medio superior y superior.

Diseño muestral y determinación del tamaño de muestra

La presente investigación adoptó un diseño de muestreo probabilístico simple. El muestreo probabilístico simple garantiza que todos los elementos de la población tengan las mismas posibilidades de ser incluidos, lo cual fortalece la objetividad y precisión de los resultados obtenidos [11].

La población objeto de estudio estuvo conformada por 246 estudiantes pertenecientes al sistema educativo de nivel básico, medio superior y superior. Para asegurar la precisión de los resultados, se calculó el tamaño óptimo de muestra utilizando la fórmula de la Ec. (1) de muestreo para poblaciones finitas:

$$n = \frac{Z^2 \cdot \sigma^2 \cdot N}{e^2(N - 1) + Z^2 \cdot \sigma^2} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde:

n =tamaño de la muestra.

Z =valor obtenido mediante nivel de confianza.

σ =desviación estándar de la población.

e =límite aceptable de error muestral.

N =tamaño de la población total.

Posteriormente se sustituyeron valores correspondientes a la ecuación y obtenemos un resultado de 150. Por lo tanto el tamaño óptimo de muestra fue de 150 estudiantes. La aplicación de esta fórmula permitió establecer el número mínimo de participantes necesarios para lograr estimaciones confiables, con un margen de error del 5% y un nivel de confianza estadístico del 95%.

Análisis de las propiedades físicas y funcionales de las hojas ecológicas

Las hojas elaboradas a partir de desechos de papel y residuos forestales fueron evaluadas considerando seis propiedades fundamentales: gramaje, espesor, textura, color, resistencia e índice de degradación.

Gramaje

El gramaje, entendido como el peso del papel por unidad de área, se determinó de forma empírica tras la elaboración de cada lote de hojas, utilizando básculas digitales. Los valores obtenidos permitieron comparar la densidad del papel ecológico con la de papeles comerciales, observándose gramajes más elevados, lo que confería a las hojas mayor cuerpo, similar al papel tipo cartulina.

Espesor

El espesor, correspondiente al grosor de cada hoja, fue medido con reglas milimétricas de precisión. Esta propiedad complementó el análisis del gramaje, permitiendo evaluar la consistencia estructural del papel ecológico en relación con su peso y su aplicabilidad práctica.

Textura

La textura fue evaluada mediante observación directa y percepción táctil, valorando su aceptabilidad para el uso escolar. Se observó que esta propiedad varió en función del tipo de malla empleada en el molde (plástica o metálica), así como del método de prensado aplicado durante el proceso de fabricación.

Color

El color también fue evaluado sensorialmente, presentando tonalidades naturales que iban del beige claro al marrón, debido a la ausencia de agentes blanqueadores. Estas variaciones cromáticas estuvieron directamente relacionadas con la proporción de fruto de (*Ficus benjamina* L.) incorporado en la mezcla.

Resistencia

La resistencia de las hojas ecológicas fue evaluada de manera cualitativa mediante una encuesta de satisfacción aplicada a 150 estudiantes de distintos niveles educativos, quienes valoraron su desempeño en contextos escolares. Esta evaluación se basó en la percepción subjetiva de los usuarios, ya que no se realizaron pruebas físicas estandarizadas.

Índice de degradación

Se llevó a cabo un experimento controlado con ocho muestras de hojas ecológicas, las cuales fueron sumergidas en agua durante 72 horas para simular un proceso natural de biodegradación. Con base en los registros de peso inicial y final de cada muestra, se calculó el porcentaje de degradación como un indicador cuantitativo de sostenibilidad, permitiendo estimar la pérdida de masa del material bajo condiciones controladas y evaluar su desempeño ambiental.

El cálculo del porcentaje de degradación se realizó aplicando la siguiente fórmula de la Ec (2).

$$\% \text{ de degradación} = (PF / PI) \times 100 \quad \text{Ec. (2)}$$

donde:

PF = corresponde al peso final tras el tratamiento de inmersión (en gramos).

PI = representa el peso inicial de la hoja ecológica antes del ensayo (en gramos).

Cada una de las ocho hojas ecológicas elaboradas a base de desechos de papel y residuos del árbol *Ficus benjamina* L. fue pesada antes y después del

ensayo utilizando una balanza digital de precisión. Posteriormente, se aplicó la fórmula para calcular el porcentaje de degradación individual por muestra Ec. (2).

A fin de interpretar los resultados obtenidos, se aplicó un análisis estadístico descriptivo e inferencial. El análisis descriptivo incluyó el cálculo de medidas de tendencia central (media, mediana), dispersión (desviación estándar y rango), así como los valores extremos (mínimo y máximo) del conjunto de datos.

Posteriormente, se realizó un análisis inferencial mediante una prueba *t* de una muestra, con el objetivo de contrastar la hipótesis de que el porcentaje de degradación de las hojas ecológicas es significativamente mayor al del papel bond convencional, cuyo valor de referencia fue fijado en 5% (0.05).

Se utilizó la fórmula de la Ec. (3), para el cálculo del estadístico *t* fue:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \quad \text{Ec. (3)}$$

donde:

\bar{x} = la media del porcentaje de degradación observado,

μ_0 = es el valor de referencia (0.05).

s= es la desviación estándar.

n= es el tamaño de la muestra (*n* = 8).

El análisis estadístico fue realizado utilizando Microsoft Excel y calculadora científica, considerando un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$) y comparando los resultados con los valores críticos de la distribución *t* de Student con 7 grados de libertad. Este tratamiento permitió determinar si el comportamiento de degradación de las hojas ecológicas representaba una diferencia estadísticamente significativa respecto al material convencional, validando su potencial como alternativa ecológica viable desde una perspectiva ambiental.

Análisis de ciclo de vida

El modelo de ciclo de vida (ACV), basado en la norma ISO 14040, comparó el papel ecológico con el papel convencional.

Análisis de rentabilidad

Por último, se realizó un análisis de rentabilidad del proyecto de producción de hojas ecológicas donde se evaluaron los costos de materiales, mano de obra, depreciación y gastos operativos, el cual asegura la viabilidad del proyecto, ajustando los precios de venta en función de los costos incrementales, destacando la rentabilidad a largo plazo.

RESULTADOS

Proceso de la producción de hojas de papel

En la Figura 3, se pueden apreciar los separadores

y sobres elaborados a base de desechos de papel y residuos forestales (*Ficus benjamín L.*).



Figura 3. Separadores y sobres elaborados a base de desechos de papel y residuos forestales (*Ficus benjamín L.*).

Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso de elaboración de hojas a base de desechos de papel y residuos forestales, se utilizaron tres opciones para el proceso de secado como se observa en la Figura 4, la primera consistió en secar la hoja directamente al sol con una duración de 2 a 3 horas; la segunda se realizó a través del clima mesotérmico, la cual tuvo una duración de 2 a 3 días; en la tercera opción se utilizó una cámara térmica a escala laboratorio para agilizar el tiempo de secado, teniendo como resultado un tiempo estimado de una 1 hora con 15 minutos.

| | Descripción | Tiempo | Imagen |
|-------------------|--|---------------------|--------|
| Energía Solar | Consiste en exponer la mezcla de la hoja a la luz solar directa, aprovechando la radiación solar para su secado. | 2-3 horas | |
| Clima Mesotérmico | Consiste en disponer la mezcla de la hoja sobre una superficie plana, permitiendo que repose de manera natural hasta alcanzar su proceso de secado completo. | 2-3 días | |
| Cámara Térmica | Consiste en colocar la mezcla de la hoja sobre un bastidor que se introduce en una cámara térmica, donde se mantiene a temperatura controlada hasta su secado. | 1 hora - 1.15 horas | |

Figura 4. Tipos de secado

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de las propiedades físicas y funcionales de las hojas ecológicas

Gramaje

Las hojas producidas mediante prensado con placas metálicas o materiales como mica presentaron un gramaje superior y más uniforme en comparación con aquellas elaboradas mediante técnicas artesanales más simples. Aunque no se cuantificó en términos de g/m² como lo establecen las normas técnicas de papel, los pesos por hoja oscilaron entre 7 g y 12 g, dependiendo de la mezcla utilizada y del grado de compresión aplicado.

En contraste, una hoja de papel bond convencional (75 g/m²) pesa aproximadamente 4.5 g en formato tamaño carta, lo cual evidencia que las hojas ecológicas poseen un gramaje notablemente superior, comparable al de cartulina delgada o papeles tipo Bristol (entre 120 y 180 g/m²), lo que les confiere mayor cuerpo y rigidez.

Espesor

El espesor de las hojas mostró una variabilidad asociada principalmente a tres factores: la cantidad de materia prima en la mezcla, el tipo de prensado y el tipo de molde utilizado. En general, las hojas producidas con mayor volumen de mezcla y menor presión de compactación resultaron más gruesas. Asimismo, el uso de moldes con malla plástica tendió a generar mayor retención de humedad y, por consiguiente, un espesor mayor en el producto final. Esta propiedad también influyó perceptiblemente en la textura y resistencia de las hojas.

Textura

La figura 5, muestra los resultados de una encuesta de percepción sensorial centrada en la textura del producto evaluado, representados mediante un gráfico circular de distribución porcentual. Se observa que el 35% de los encuestados calificó la textura como satisfactoria, seguido por un 25% que la consideró de calidad media y un 22% que la describió como muy buena. Asimismo, un 17% la valoró como excelente, mientras que solo el 1% manifestó una percepción deficiente. Estos resultados sugieren una predominancia de opiniones positivas respecto a la textura, con más del 95% de los participantes ubicando su experiencia entre los rangos de "satisfactoria" a "excelente", lo que indica una aceptación general favorable del atributo evaluado.

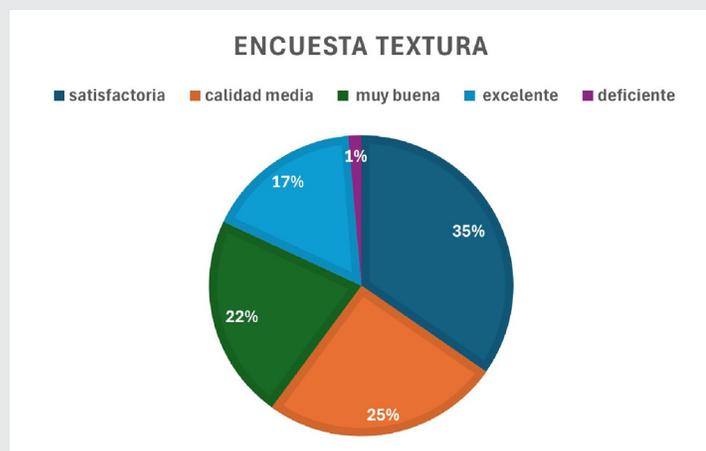


Figura 5. Encuesta de textura.
Fuente: Elaboración propia.

Color

Los resultados obtenidos en la encuesta enfocada en el atributo color se pueden apreciar en la Figura 6, en donde se muestra la proporción porcentual de cada nivel de aceptación. El análisis revela que el 32% de los participantes calificó el color del producto como satisfactorio, seguido por un 30% que lo consideró

de calidad media y un 27% que lo evaluó como muy bueno. En menor proporción, el 7% opinó que el color fue excelente, mientras que únicamente un 4% manifestó una percepción deficiente. Estos resultados indican que más del 90% de los encuestados percibieron el color del producto de manera favorable (entre satisfactoria y excelente), lo cual refleja un alto grado de aceptación visual, siendo un parámetro positivo dentro de la evaluación sensorial del producto.

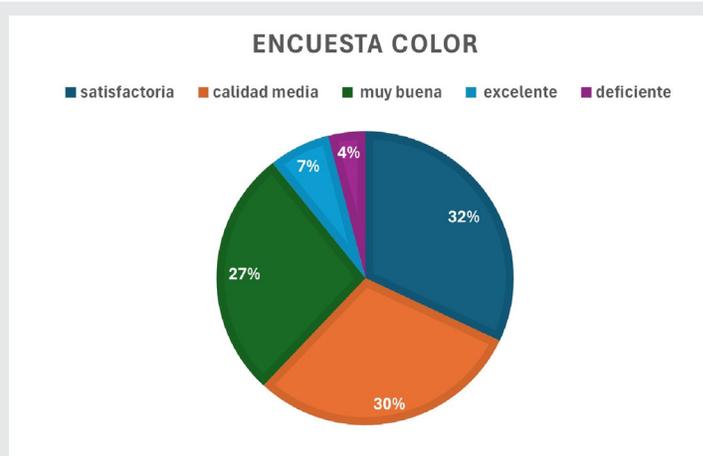


Figura 6. Encuesta de color.
Fuente: Elaboración propia.

Resistencia

En relación con la resistencia del producto evaluado, los resultados obtenidos se reflejan en la Figura 7, adquiriendo una percepción mayoritariamente favorable por parte de los encuestados. El 36% calificó la resistencia como satisfactoria, mientras que el 29% la consideró de calidad media y el 17% como muy buena. Además, un 15% otorgó una valoración excelente, y solo un 3% indicó una apreciación deficiente. Este perfil de respuestas sugiere que el atributo resistencia presenta un alto nivel de aceptación, ya que más del 95% de las valoraciones se sitúan entre los niveles medio y alto, lo cual respalda la solidez percibida del producto y refuerza su viabilidad desde el enfoque sensorial y funcional.



Figura 7. Encuesta de resistencia.
Fuente: Elaboración propia.

Índice de degradación

En la Tabla 1, se observa el porcentaje de degradación que corresponde a las ocho hojas ecológicas elaboradas a base de desechos de papel y residuos del árbol (*Ficus benjamina L.*). Para ello se ocupó la fórmula de la Ec. 2.

Tabla 1. Porcentaje de degradación de hojas ecológicas tras inmersión en agua.

| Muestra | % Degradación |
|---------|---------------|
| 1 | 59 |
| 2 | 61.5 |
| 3 | 61.3 |
| 4 | 57.8 |
| 5 | 7.5 |
| 6 | 12.5 |
| 7 | 12.5 |
| 8 | 16.6 |

Fuente: Elaboración propia

Análisis descriptivo

Posteriormente, se calcularon medidas de tendencia central y dispersión con el objetivo de caracterizar el comportamiento general de la muestra. El porcentaje medio de degradación fue de 36.1%, mientras que la mediana alcanzó un valor de 37.2%, lo cual sugiere una distribución relativamente simétrica de los datos. La desviación estándar, de $\pm 25.6\%$, indica una alta variabilidad entre las muestras analizadas. El valor mínimo registrado fue de 7.5%, y el máximo de 61.5%, lo que genera un rango de 54.0%, evidenciando una dispersión considerable en los niveles de descomposición.

Esta variabilidad puede atribuirse a factores como la heterogeneidad en la composición del material reciclado o en la proporción de residuos utilizados durante la fabricación de las hojas. A pesar de ello, el promedio observado supera ampliamente el valor de referencia correspondiente al papel bond convencional (5%), lo cual representa una ventaja significativa desde el punto de vista ambiental y valida la eficacia del material propuesto en términos de biodegradabilidad.

Análisis inferencial

Con el fin de contrastar estadísticamente si las hojas ecológicas presentan una degradación superior al papel bond, se aplicó una prueba *t* de una muestra, bajo las siguientes hipótesis:

H_0 (Hipótesis nula): $\mu = 0.05$ (las hojas ecológicas se degradan igual que el papel bond).

H_1 (Hipótesis alternativa): $\mu > 0.05$ (las hojas ecológicas se degradan más que el papel bond).

El valor del estadístico *t* fue: 3.545. Con 7 grados de libertad y un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$), el valor crítico de *t* es aproximadamente 1.895. Dado que: $t_{\text{calculado}} = 3.545 > t_{\text{crítico}} = 1.895$. Por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el porcentaje de degradación de las hojas ecológicas es significativamente mayor al del papel bond convencional.

En la Figura 8, se muestra el análisis comparativo del tiempo de degradación de dos tipos de papel: la primera es una hoja de papel de tipo convencional en este caso una hoja de papel bond y el otro tipo de papel es una hoja elaborada con desechos de papel y residuos forestales (*Ficus benjamina L.*), los resultados mostraron que la hoja convencional permaneció intacta mientras que la hoja ecológica comenzó a descomponerse a los cinco días.



Figura 8. Proceso de degradación de la hoja convencional y ecológica.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados confirman la eficacia ambiental del material, destacando su alta biodegradabilidad y posicionándolo como una alternativa ecológica viable frente a productos escolares convencionales, en apoyo a los objetivos de sostenibilidad y producción responsable.

Análisis de ciclo de vida

La comparación con fibras vegetales convencionales evidencia que el papel elaborado con (*Ficus benjamina L.*) presenta un gramaje elevado, buena biodegradabilidad y aceptación por parte de los usuarios. En la Tabla 2, se muestra la degradación de las hojas elaboradas con (*Ficus benjamina L.*) dando un total de (61.5% máx.) este valor es similar a la de la fibra de coco (57%), y superior a la de fibras agrícolas tratadas. Aunque su textura es más áspera y su resistencia moderada, cumple con parámetros aceptables para un proceso artesanal. Estos resultados están alineados con las normas ISO (536, 1924-2, 535, 20200), respaldan su viabilidad como material ecológico competitivo.

Tabla 2. Comparación técnica entre fibras vegetales utilizadas en papel ecológico.

| Propiedad | Norma ISO Aplicable | Ficus benjamina L. (presente estudio) | Fibra de coco (Daza et al., 2024) | Fibras agrícolas no leñosas (El-Sakhawy et al., 2020) |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---|
| Gramaje | ISO 536 | 120–180 g/m ² | 453 g/m ² | 130–300 g/m ² |
| Espesor | ISO 534 | Variable (alto en moldes plásticos) | Alto (fibra gruesa) | Medio-alto |
| Resistencia a la tracción | ISO 1924-2 | Moderada (defectos del 15.7%) | Alta resistencia estructural | Dependiente del tratamiento químico |
| Absorción de agua | ISO 535 | Por evaluar | 580 g/m ² | 179–375 g/m ² (documentado) |
| Degradación (ambiental) | ISO 20200 / prueba de compost | 36.1% media (máx. 61.5%) | 57% en 14 días | Alta degradabilidad |
| Textura | Evaluación sensorial (no ISO) | Áspera, aceptable por 36% | Rugosa y firme | Fina o fibrosa |
| Color | ISO 2469 / observación visual | Beige-marrón natural | Beige claro | Varía según el material |
| Evaluación del usuario | Encuesta validada | 34.7% apariencia satisfactoria | No evaluado | Alta aceptación |

Fuente: Elaboración propia.

Se comparó el impacto ambiental del papel ecológico elaborado con residuos de (*Ficus benjamina L.*) y papel reciclado frente al papel convencional tipo bond (a base de celulosa virgen de madera), utilizando una metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) según norma ISO 14040.

Tabla 3. Modelo Simplificado de Impacto Ambiental por Hoja.

| Fuente de impacto | Papel de Ficus (g CO2 eq) | Papel bond (g CO2 eq) |
|-------------------|---------------------------|-----------------------|
| Materia prima | 5 | 45 |
| Producción | 8 | 70 |
| Transporte | 2 | 10 |
| Fin de vida útil | -5 | 0 |
| Total estimado | 10 | 125 |

Fuente: Elaboración propia.

El análisis comparativo del ciclo de vida evidencia que el papel elaborado con (*Ficus benjamina L.*) y papel reciclado presenta un impacto ambiental significativamente menor que el papel convencional. En la Tabla 3, se muestran las diferencias más notables en donde se observan en la obtención de materias primas y en el fin de vida útil, ya que el papel ecológico no requiere tala de árboles y presenta una alta biodegradabilidad. Además, su huella hídrica y de carbono es considerablemente más baja. Este modelo simplificado respalda la viabilidad ambiental del producto y lo posiciona como una alternativa sostenible frente a materiales escolares tradicionales.

En Colombia, se llevó a cabo un análisis de ciclo de vida (ACV) comparativo entre la producción de papel a base de pino y cáñamo utilizando la herramienta OpenLCA y siguiendo la norma ISO 14040:2006. Los resultados indicaron que el cáñamo presenta menores impactos

ambientales en varias categorías evaluadas, posicionándolo como una alternativa más sostenible frente al uso de madera tradicional [12].

En el contexto para fortalecer la sostenibilidad y competitividad del producto, se propone la incorporación de certificaciones ambientales como la distinción Industria Limpia (PROFEPA) y la norma ISO 14001, las cuales validarían el cumplimiento ambiental del proceso productivo y mejorarían su aceptación y valor comercial en mercados exigentes.

Análisis económico

En la Tabla 4, se puede apreciar la producción anual de hojas ecológicas y esta se estima en 306,000 hojas, con un precio de venta de \$2.11 MXN por hoja. Esta producción se distribuye en 1,020 lotes de 300 hojas ecológicas cada uno, generando ingresos anuales por venta de \$644,726.95 MXN. Después de deducir los costos y gastos operativos, se obtiene una utilidad neta de \$396,724.82 MXN.

Tabla 4. Producción anual de hojas ecológicas.

| PRODUCCIÓN ANUAL DE HOJAS ECOLÓGICAS | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------|---------------|
| Nº HOJAS | PRECIO DE VENTA | Nº LOTES DE 300 HOJAS ECOLÓGICAS | INGRESOS ANUALES POR VENTA | UTILIDAD NETA |
| 306,000 | \$2.11 | 1020 | \$644,726.95 | \$396,724.82 |

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La elaboración de hojas ecológicas a partir de desechos de papel y residuos del árbol (*Ficus benjamina L.*) demostró ser una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable, con alto potencial de replicabilidad en entornos sostenibles. El análisis de biodegradación evidenció una degradación temprana a los cinco días y completa en un mes, en contraste con el comportamiento mínimo del papel convencional. Con un promedio de degradación del 36.1%, los resultados respaldan la alta biodegradabilidad del producto, en línea con estudios previos sobre papel a base de biomasa vegetal.

Desde el punto de vista económico, se proyectó una utilidad neta anual de \$396,724.82 MXN, con la producción estimada de 306,000 hojas ecológicas, lo que confirma la rentabilidad del modelo, especialmente en comunidades con recursos limitados. Además, la evaluación social mostró una alta aceptación del producto por parte de los usuarios, destacando su apariencia, resistencia y el bajo impacto ambiental percibido.

En el ámbito legal y comercial, se identificó la posibilidad de registrar el proceso bajo esquemas de propiedad industrial como modelo de utilidad, diseño industrial o marca registrada, lo que fortalecería su posicionamiento en el mercado ecológico. El proyecto, además, contribuye directamente al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 9, 12 y 13, al promover innovación, economía circular y mitigación ambiental.

No obstante, se reconocen limitaciones asociadas al proceso artesanal, que afecta la capacidad y eficiencia de producción, especialmente en la etapa de secado. Por ello, se sugiere incorporar mejoras técnicas como la automatización parcial y sistemas de secado controlado, así como la exploración de nuevas combinaciones de residuos para mejorar las propiedades del producto. Estas acciones permitirán escalar el proyecto y consolidarlo como una solución sustentable para el sector educativo y ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020 – Main report (Interactive version)*. FAO. <https://www.fao.org/interactive/forest-resources-assessment/2020/en/>.

[2] Comisión Nacional Forestal. (s.f.). *Deforestación en México. Sistema Nacional de Monitoreo Forestal*. <https://snmf.cnf.gob.mx/deforestacion/>.

[3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Seguridad, Medio Ambiente y Agua: Revista SMA, edición 1*. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenidos/inegi/sma/doc/Revista_Eco1_2021.pdf

[4] Prada Bartolomé, N. (19 de junio de 2017). *Productos ecológicos: Mercado y marketing*. [Archivo PDF]. https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/24942/TFG-M_N992.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

[5] Comisión para la Cooperación Ambiental. (2017). *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte: Documento técnico*. <https://www.cec.org/files/documents/publications/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>.

[6] Medina-Martínez, N. E. (2024). *Iniciativas internacionales de crecimiento verde en América Latina*. Disponible en: <https://repositorio.uniagustiniana.edu.co/items/356a0828-b757-4ac5-9585-d441d-36d62af>.

[7] García-Berfon, Luis, Armijos-Riofrio, Chabaco, Aguilar-Ramírez, Silvio, López-Cordova, Carmen, Ramírez-Robles, Jorge, Calva-Luzon, Mayra, & Pogo-Tacuri, Enith. (2021). *Estudio de especies no leñosas de la provincia de Loja (Ecuador) como potenciales materias primas para la fabricación de papel artesanal*. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 22(2) Epub 30 de julio de 2021. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.2.011>.

[8] Cortez Vega, A. E. (2014). *Elaboración de papel a base de residuos de banano*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Católica de Santiago de

Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/1706/1/T-UCSG-PRE-ESP-CFI-7.pdf>.

[9] Ceballos, B., Lamata, M. T., Pelta, D. A., & Sánchez, J. M. (2013). *El método TOPSIS relativo vs. absoluto*. *Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 14(2), 181–192. https://www.researchgate.net/publication/272096633_El_metodo_TOPSIS_relativo_vs_absoluto.

[10] Funes, A. (5 de julio de 2019). *¿Cómo hacer papel reciclado de manera artesanal? El español*. Disponible en: https://www.elespanol.com/como/hacer-papel-reciclado-manera-artesanal/372213158_0.html.

[11] Hernández Sampieri, R.; Fernández-Collado, C. & Baptista Lucio, P. *Metodología de la Investigación*. 4ª ed. Ciudad de México, McGraw-Hill, 2006. Disponible en: https://competenciashg.files.wordpress.com/2012/10/sampieri-et-al-metodologia-de-la-investigacion-4ta-edicion-sampieri-2006_ocr.pdf.

[12] Medina Rodríguez, P. A., & Dávila Rincón, J. A. (2022). *Análisis de ciclo de vida de la producción de papel a partir de cáñamo en el contexto colombiano*. Disponible en: <https://agris.fao.org/search/en/providers/124912/records/67bc9aff7a9727816ad32261>.

