Influence of potassium hydroxide on the chemical, physical, and mechanical properties of *Sansevieria trifasciata* fibers

Celso Eslin Caruajulca Vásquez[1], Cecilia Duberkely Caruajulca Vásquez[2], Alexander Yushepy Vega Anticona[3]
[1,2,3]*Universidad Nacional de Trujillo, Perú*
cecaruajulcav@unitru.edu.pe[1]; cdcaruajulcava@unitru.edu.pe[2]; avega@unitru.edu.pe[3]

Abstract: ***This study evaluated the effect of potassium hydroxide (KOH) concentration on the chemical, physical, and mechanical modification of individual fibers extracted from *Sansevieria trifasciata* leaves, aiming to establish optimal conditions for their use as reinforcement in sustainable composite materials. The fibers were obtained via water immersion and subsequently subjected to alkaline treatments using KOH solutions at concentrations of 7.5, 12.5, and 25.0 g/L, alongside an untreated control group. Characterization included the determination of lignin, cellulose, and hemicellulose content, thermogravimetric analysis (TGA), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), and uniaxial tensile tests conducted according to the ASTM D3379-89 standard, with 11 replicates per treatment to ensure statistical robustness. The results showed that increasing the KOH concentration progressively reduced lignin content (from 21.52% to 16.62%) and hemicellulose content (from 15.01% to 11.38%), while alpha-cellulose content increased from 55.20% to 59.32%. Additionally, the alkaline treatment reduced moisture content and increased fiber surface roughness. Regarding tensile strength, the highest value was recorded at a KOH concentration of 7.5 g/L, reaching 598.15 MPa—an increase of over 73% compared to untreated fibers (344.89 MPa). Thermal analysis revealed a consistent shift toward higher degradation temperatures in the treated fibers. Statistical analysis using ANOVA confirmed significant differences between treatments ($p \leq 0.05$) for the breaking mass variable. In conclusion, the results demonstrate that the alkaline treatment significantly modifies the structure and performance of the individual fibers, with the 7.5 g/L KOH concentration being the best condition among those evaluated.***

Keywords: Lignocellulosic fibers; Sansevieria trifasciata; alkaline treatment; tensile strength; thermal stability.

Influencia del hidróxido de potasio en las propiedades químicas, físicas y mecánicas de las fibras de *Sansevieria trifasciata*

Celso Eslin Caruajulca Vásquez[1], Cecilia Duberkely Caruajulca Vásquez[2], Alexander Yushepy Vega Anticona[3] [1,2,3]Universidad *Nacional de Trujillo, Perú*
cecaruajulcav@unitru.edu.pe[1]; cdcaruajulcava@unitru.edu.pe[2]; avega@unitru.edu.pe[3]

Resumen: ***El estudio evaluó el efecto de la concentración de hidróxido de potasio (KOH) sobre la modificación química, física y mecánica de fibras individuales extraídas de hojas de Sansevieria trifasciata, con el fin de establecer las condiciones óptimas para su uso como refuerzo en materiales compuestos sostenibles. Las fibras fueron obtenidas mediante inmersión en agua y posteriormente sometidas a tratamientos alcalinos con soluciones de KOH al 7,5; 12,5 y 25,0 g/L, además de un grupo control sin tratamiento. La caracterización incluyó la determinación del contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa, análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), microscopía electrónica de barrido (SEM) y ensayos de tracción uniaxial realizados según la norma ASTM D3379-89, con 11 repeticiones por tratamiento para garantizar la robustez estadística. Los resultados mostraron que el incremento de la concentración de KOH redujo progresivamente los contenidos de lignina de (21,52 % a 16,62 %) y hemicelulosa, de (15,01 % a 11,38 %), mientras que el contenido de alfa celulosa aumentó de 55,20 % a 59,32 %. Asimismo, el tratamiento alcalino redujo el contenido de humedad e incrementó la rugosidad superficial de la fibra. En términos de resistencia a la tracción, el valor más alto se registró con 7,5 g/L de KOH, alcanzando los 598,15 MPa, un incremento superior al 73 % en comparación con las fibras sin tratamiento (344,89 MPa). El análisis térmico reveló un desplazamiento consistente hacia mayores temperaturas de degradación en las fibras tratadas. El análisis estadístico mediante ANOVA confirmó diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0,05$) para la variable masa de ruptura. En conclusión, los resultados demuestran que el tratamiento alcalino modifica de manera significativa la estructura y el desempeño de las fibras individuales, siendo la mejor condición entre las evaluadas la concentración de 7,5 g/L de KOH.***

Palabras clave: ***Fibras lignocelulósicas; Sansevieria trifasciata; tratamiento alcalino; resistencia a la tracción; estabilidad térmica.***

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el efecto que causa el hidróxido de potasio (KOH) sobre la modificación química, física y mecánica de las fibras individuales extraídas de la *Sansevieria trifasciata*. Aunque esta especie actualmente es reconocida mundialmente como planta ornamental por su resistencia y uso en espacios interiores, posee propiedades estructurales y químicas que representan un recurso industrial valioso, aunque poco explorado y aprovechado hasta la fecha [1]. Conocida popularmente como "lengua de suegra" o "espada de San Jorge", la *Sansevieria trifasciata* se distribuye de forma natural y cultivada en regiones tropicales y subtropicales de todos los continentes, mostrando una notable capacidad de adaptación a suelos pobres y climas variables [2]; en el territorio peruano, crece de manera abundante en zonas de la costa, sierra y selva, lo que garantiza un suministro constante y de bajo costo para su uso en investigación y desarrollo tecnológico [3]. Ante este escenario, surge la interrogante que orienta este trabajo: ¿es posible optimizar las propiedades de las fibras individuales de *Sansevieria trifasciata* mediante variaciones controladas de la concentración de KOH, para convertirlas en un refuerzo eficiente para materiales compuestos? El interés por las fibras lignocelulósicas como alternativa a las fibras sintéticas ha crecido de forma acelerada en los últimos años, impulsado por sectores como la industria automotriz, la construcción ligera y el diseño de materiales sostenibles [4]. En este contexto, la modificación química dirigida de las fibras individuales representa una estrategia clave para corregir sus limitaciones naturales y ampliar sus posibilidades de aplicación industrial [5]. De esta manera, las fibras procesadas de *Sansevieria trifasciata* se perfilan como una opción potencialmente ecoamigable para sustituir componentes sintéticos en paneles internos, revestimientos, materiales aislantes y piezas estructurales ligeras, su factibilidad práctica requiere confirmación mediante ensayos en matriz polimérica [6].

La mayoría de los estudios publicados sobre tratamiento alcalino de fibras del género *Sansevieria* han empleado

hidróxido de sodio (NaOH) como principal agente modificador [7], demostrando mejoras en resistencia y estabilidad, pero sin caracterizar el comportamiento diferencial del KOH [8, 9]. Si bien el NaOH es efectivo para remover sustancias amorfas, su menor radio iónico produce una acción más agresiva que, a concentraciones medias o altas, puede degradar incluso la celulosa cristalina, debilitando la estructura de la fibra [9]. A diferencia del NaOH, el KOH presenta un radio iónico mayor que le permite penetrar de manera más gradual y uniforme, favoreciendo una modificación progresiva y selectiva: elimina componentes lábiles (humedad, hemicelulosa, lignina parcial) sin comprometer la integridad de la fracción celulósica ordenada [10].

Además, la literatura existente ha centrado su atención en la fibra en conjunto o integrada en materiales compuestos, sin establecer cómo varían composición, morfología y propiedades mecánicas de la fibra individual al ajustar sistemáticamente la concentración de KOH [8]. Hasta ahora no se ha documentado si este álcali genera umbrales de respuesta distintos a los reportados para el NaOH, ni cuál es el rango óptimo específico para esta especie [11].

El presente trabajo aporta conocimiento nuevo al demostrar que: (i) el tratamiento con KOH aumenta el contenido de alfa-celulosa de 55,20 % a 59,32 % y reduce humedad, lignina y hemicelulosa de forma proporcional a la concentración, comportamiento que contrasta con la mayor degradación observada con NaOH en rangos similares; (ii) la concentración de 7,5 g/L de KOH produce la resistencia a la tracción más alta (598,15 MPa), superando valores reportados para NaOH en condiciones equivalentes; y (iii) desplaza la temperatura media de degradación de 350 °C a 356 °C, mejorando moderadamente la estabilidad térmica sin alterar el mecanismo de descomposición, lo que evidencia una acción más suave y predecible. Estos resultados validan el KOH como alternativa ventajosa al NaOH para el tratamiento de fibras de *Sansevieria trifasciata* y definen las concentraciones más favorables para su aplicación.

La necesidad de desarrollar estos materiales responde además a una crisis ambiental y sanitaria de escala global: la producción y consumo de plásticos derivados del petróleo alcanza actualmente un promedio de 111 kg por persona al año, y la liberación de micropartículas en el medio ambiente ha generado contaminación persistente en suelos, ríos y océanos [12, 13]. Estudios recientes indican que cada individuo ingiere alrededor de 50 000 partículas de microplástico anualmente, asociadas a daños en el sistema digestivo y acumulación en tejidos orgánicos; a esto se suma que la fabricación de materiales sintéticos genera altas emisiones de gases de efecto invernadero y depende de recursos no renovables [14 - 15]. Este escenario exige con urgencia el desarrollo de alternativas biodegradables que cumplan con los estándares técnicos sin comprometer la salud humana ni la estabilidad de los ecosistemas [16]. En respuesta, la demanda mundial de materiales renovables ha aumentado de forma sostenida, impulsando la búsqueda de especies vegetales que ofrezcan buenas propiedades mecánicas y disponibilidad local [17, 18]. Sin embargo, las fibras naturales presentan limitaciones intrínsecas: su composición variable, alta absorción de humedad y baja adhesión a matrices poliméricas reducen su rendimiento en aplicaciones exigentes [19]. Además, la mayoría de los estudios existentes se centran en compuestos finales, quedando aún por definir cómo los tratamientos químicos modifican de forma específica las propiedades de la fibra individual, la unidad básica que determina el comportamiento del material compuesto, lo que dificulta el diseño de procesos adaptados a la *Sansevieria trifasciata* [8, 9]. En este marco, las fibras de *Sansevieria trifasciata* constituyen una materia prima prometedora para el contexto peruano, gracias a su abundancia, bajo costo y composición rica en celulosa el componente responsable de su resistencia mecánica [3, 20 y 21]. No obstante, al igual que otras fibras lignocelulósicas, su estructura natural contiene hemicelulosa, lignina y ceras superficiales que reducen su compatibilidad y resistencia [19]. El tratamiento alcalino con KOH se ha identificado como una de las técnicas más efectivas para modificar estas características: al interactuar con la estructura de la fibra, elimina parcialmente los componentes no deseados, aumenta la rugosidad superficial y reordena las cadenas de celulosa, lo que produce cambios mensurables en sus propiedades químicas, físicas y mecánicas [4 y 6]. A pesar de estos avances, existe una brecha importante en la investigación: no se ha establecido de forma sistemática cómo variaciones en la concentración de KOH modifican de manera diferenciada cada una de estas propiedades en la fibra individual de *Sansevieria trifasciata*, ni cuáles son los rangos óptimos para obtener el mejor rendimiento [8, 9]. Este estudio busca llenar ese vacío científico, aportando evidencia rigurosa sobre los cambios que se producen en la fibra tras el tratamiento, y sentando las bases para su aprovechamiento eficiente en el país.

Los hallazgos de esta investigación también podrían generar impactos positivos potenciales más allá del ámbito científico: al conocer con precisión cómo optimizar la fibra individual, se podrán desarrollar tecnologías locales adaptadas a los recursos peruanos, promoviendo la innovación en sectores productivos y la creación de cadenas de valor basadas en biodiversidad nacional [22]. La magnitud real de beneficios ambientales incluyendo consumo de agua, reactivos y generación de efluentes requiere evaluación específica mediante análisis de ciclo de vida. Asimismo, la sustitución de fibras sintéticas por estas alternativas podría reducir la huella de carbono de la industria y su dependencia de insumos importados [23]. El desarrollo de esta línea de investigación podría además generar nuevas oportunidades de empleo en zonas rurales, en actividades de cultivo sostenible, extracción y procesamiento de la fibra, fortaleciendo la economía regional [24]. Finalmente, el uso de estos materiales contribuye directamente a la protección ambiental, al reducir la generación de residuos plásticos y promover modelos de producción circular [25].

En función de lo expuesto, esta investigación tiene como objetivo determinar el efecto del aumento de la concentración de hidróxido de potasio (KOH) sobre la modificación química, física y mecánica de las fibras individuales extraídas de la *Sansevieria trifasciata*.

II. METODOLOGÍA

2.1 Diseño de la investigación

Se desarrolló un estudio experimental, cuantitativo y transversal, con diseño unifactorial completamente aleatorizado. Se evaluó el efecto de la concentración de hidróxido de potasio (KOH) sobre las propiedades químicas, físicas y mecánicas de fibras individuales de *Sansevieria trifasciata*. Se establecieron cuatro grupos experimentales: un grupo control sin tratamiento alcalino y tres tratamientos con soluciones de KOH a 7,5 g/L, 12,5 g/L y 25,0 g/L. Cada condición contó con n = 11 réplicas independientes para ensayos de tracción. Para caracterización química, térmica y espectroscópica se emplearon 3 réplicas por condición; los valores reportados corresponden a promedios. En la Tabla 1 se detallan las variables y niveles considerados.

TABLA I
DESCRIPCIÓN DE VARIABLES Y NIVELES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.

Variable independiente	Niveles de tratamiento	Variables dependientes evaluadas
Factor A: Concentración de KOH	a_1: 7,5 g/L a_2: 12,5 g/L a_3: 25,0 g/L Grupo control: 0g/L	• Químicas: Humedad, extractivos, lignina, holocelulosa, alfa/beta/gamma celulosa • Físicas: Diámetro, morfología superficial (SEM) • Mecánicas: Resistencia a la tracción, alargamiento a la rotura, módulo elástico • Térmicas: Temperaturas de degradación, perfil de descomposición (TGA) • Espectroscópicas: Cambios en grupos funcionales (FTIR)

El número total de ensayos de tracción se calculó como:

- Ensayos con tratamiento: 3 niveles × 11 réplicas = 33
- Ensayos sin tratamiento: 1 × 11 réplicas = 11
- Total de ensayos: 44

2.2 Material biológico y ámbito del estudio

El material de estudio corresponde a fibras individuales extraídas de hojas sanas y maduras de *Sansevieria trifasciata*, recolectadas en la provincia de Trujillo, región La Libertad, Perú. Se seleccionaron ejemplares con desarrollo homogéneo, descartando aquellos con daños físicos o fitosanitarios.

2.3 Procedimiento experimental

El proceso completo desde la obtención hasta la caracterización de las fibras se resume en el diagrama de la Figura 1:

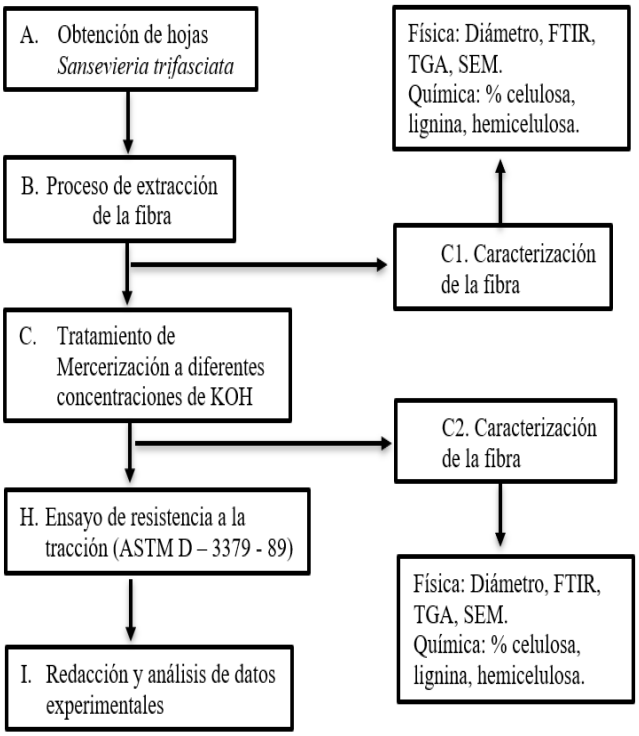


Fig. 1 Diagrama secuencial del procedimiento experimental.

2.3.1 Extracción de fibras. - Las fibras se obtuvieron mediante inmersión de hojas en agua potable durante 14 días, para facilitar la separación de tejidos blandos (proporción 2 L de agua por kg de material foliar, 22–25 °C). Posteriormente se lavaron con agua destilada y se secaron a temperatura ambiente hasta peso constante. Se reconoce que esta etapa consume volumen de agua; el balance hídrico y la gestión de efluentes se abordarán en estudios posteriores.

2.3.2 Tratamiento alcalino. - Se prepararon soluciones acuosas de KOH a 7,5; 12,5 y 25,0 g/L. Las fibras se sumergieron manteniendo relación líquido/materia prima 20:1, con agitación suave (100 rpm) durante 2 h a 25 °C. Se enjuagó con agua corriente y posteriormente con agua destilada hasta pH 7 ± 0,2. Se secó a 40 °C hasta peso constante. El grupo control no recibió tratamiento alcalino. La neutralización de efluentes y la recuperación del álcali son aspectos a optimizar en escalado industrial.

2.3.3 Ensayos mecánicos. - Se realizaron ensayos de tracción uniaxial siguiendo estrictamente la norma ASTM D3379-89 (reafirmada en 2021) —Standard Test Method for High-Modulus Single-Filament Materials) [26], cuyas especificaciones dimensionales de la probeta se muestran en la Figura 2:

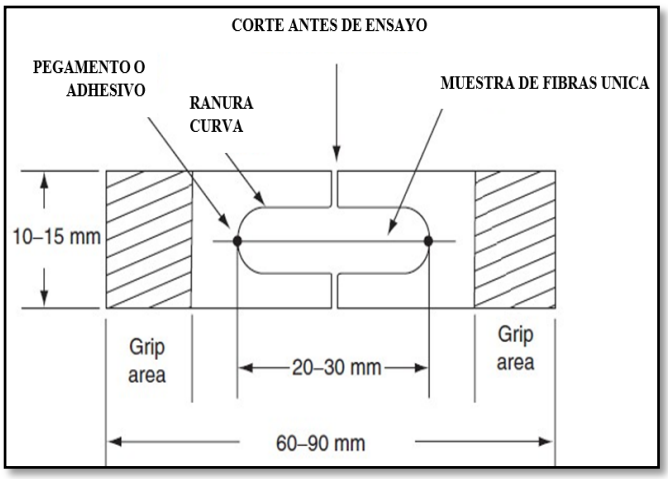


Fig. 2 Especificaciones dimensionales de la probeta para ensayo de tracción en fibras individuales, según norma ASTM D3379-89.

Nota: Cálculo por réplica. - Para cada fibra se midió diámetro en tres posiciones con microscopía óptica (±0,001 mm), se calculó área transversal asumiendo geometría circular ($A = \pi . d^2/4$). Esta simplificación se justifica por la sección aproximadamente circular observada en micrografías SEM. La resistencia a la tracción se obtuvo como ($\sigma = F/A$) para cada fibra, luego se promedió por tratamiento. Los diámetros de la Tabla IV corresponden a mediciones para cálculo de área; los de la discusión provienen de mediciones complementarias por SEM, ambas concordantes dentro de desviación estándar.

2.3.4 Caracterización química y física

- Química: Humedad (secado a 105 °C hasta peso constante); extractivos (extracción etanol-agua 1:1, reflujo 6 h); lignina insoluble (método Klason, H_2SO_4 72 %, 20 °C, 4 h); holocelulosa (clorito de sodio, 75 °C); alfa-celulosa (NaOH 17,5 M, 20 °C); beta y gamma celulosa por diferencia. Normas de referencia: TAPPI T204, T211, T222. [27]
- FTIR: Muestras molidas con KBr (10 mg/200 mg, pastilla prensada); rango 4000–400 cm^{-1}, resolución 4 cm^{-1}, 32 barridos [28].
- SEM: Fibras recubiertas con Au/Pd (10 nm); voltaje de aceleración 15 kV; detectores de electrones secundarios y retro dispersados [29].

2.3.5 Procedimiento del TGA

Se analizaron muestras de fibras sin tratamiento y tratadas con KOH (7,5; 12,5 y 25,0 g/L), previamente secadas y pesadas en 8–12 mg en crisol de alúmina. El ensayo se realizó bajo atmósfera de nitrógeno (flujo 50 mL/min), con calentamiento de 10 °C/min desde 30 °C hasta 600 °C, registrando la pérdida de masa en función de la temperatura. Se realizaron 2 mediciones por condición; los valores se presentan como promedio con rango de variación [30].

Las curvas obtenidas (Figura 7) mostraron perfiles de degradación similares en todas las muestras; sin embargo, las fibras tratadas presentaron desplazamiento hacia temperaturas superiores (Figuras 8 y 9): de 280 °C a 288 °C en el inicio, de 423 °C a 434 °C en el final, y de 350 °C a 356 °C en la temperatura media de degradación, siendo el tratamiento de 25,0 g/L el más destacado. Se identificaron tres etapas: humedad, descomposición de hemicelulosa y degradación de celulosa y lignina. Se concluye que el tratamiento mantiene el mecanismo de descomposición y mejora moderadamente la estabilidad térmica de la fibra; dado el número limitado de réplicas, esta interpretación debe considerarse con precaución.

2.4 Análisis estadístico. - El procesamiento y evaluación de los datos experimentales se realizó mediante el análisis de varianza de un factor (ANOVA), con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre los distintos tratamientos aplicados. Se estableció un nivel de confianza del 95 %, considerando un valor de significancia estadística igual o inferior a 0,05 ($p \leq 0,05$). Se verificó normalidad (Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (Levene). Se utilizó el software OriginPro 9.6 para el procesamiento estadístico. La hipótesis nula estableció la igualdad entre las medias de los tratamientos, mientras que la hipótesis alternativa consideró la existencia de diferencias significativas entre ellas.

III. RESULTADOS

A. Proceso de extracción y análisis de la sección transversal

Se seleccionaron hojas de *Sansevieria trifasciata* con dimensiones similares en ancho y longitud, extrayendo las fibras exclusivamente de la zona media de la lámina foliar (ver Figura 3). Con el fin de facilitar la separación de tejidos blandos y reducir imperfecciones superficiales, las hojas se sumergieron en agua potable en proporción de 2 L por cada kg de material vegetal, durante un periodo de 14 días. Posteriormente, se realizó una selección mediante microscopía óptica estereoscópica a 20 aumentos, descartando fibras con daños visibles y registrando el diámetro tanto en muestras sin tratamiento como en aquellas sometidas a mercerización (ver Figura 4). Los valores obtenidos fueron corroborados mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), confirmando la precisión de las mediciones de sección transversal (ver Figura 5).

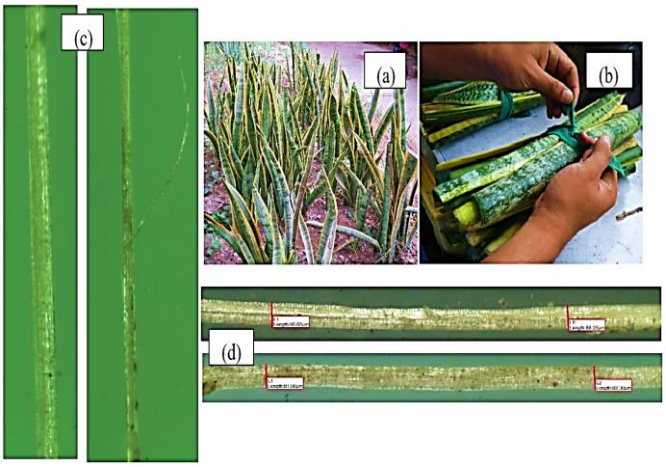


Fig. 3 (a) Hojas de *Sansevieria trifasciata*; (b) Zona central seleccionada para la extracción; (c) Evaluación de la morfología superficial; (d) Medición de la sección transversal.

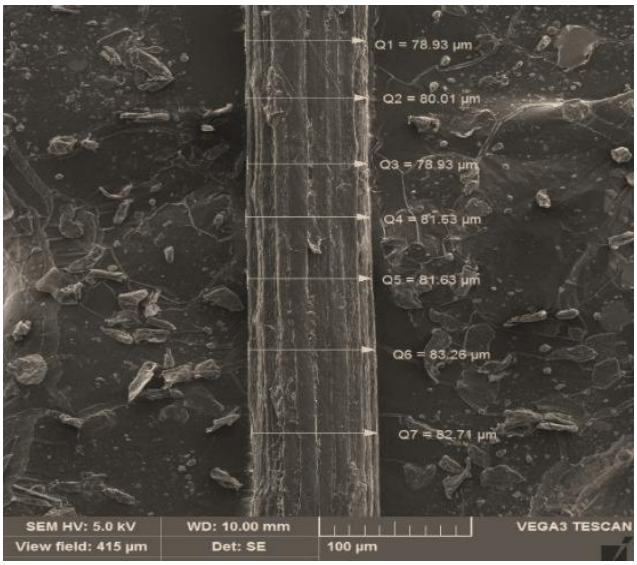


Fig. 4 Secciones transversales de fibras: (a) Sin tratamiento; (b) 7,5 g/L KOH; (c) 12,5 g/L KOH; (d) 25,0 g/L KOH.

Nota: La Figura 4 muestra el diámetro promedio en cada condición experimental.

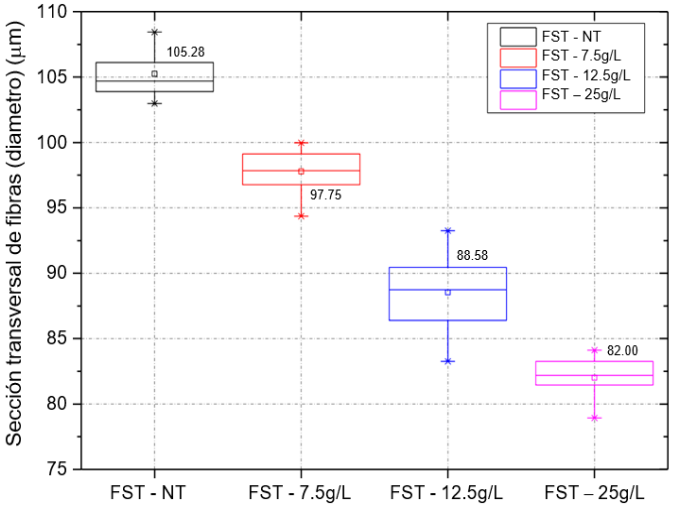


Fig. 5 Valores de las secciones transversales de fibras según concentraciones empleadas de hidróxido de potasio. Ningún tratamiento (NT); 7.5g/L de KOH; 12.5g/L de KOH y 25g/L de KOH.

El rendimiento del proceso de extracción se presenta en la Tabla II, donde se observa un porcentaje promedio de fibras secas extraídas del 6,75 %, con valores individuales entre 6,23 % y 7,30 %. Estos resultados confirman la reproducibilidad del método y la disponibilidad constante de materia prima viable.

TABLA I I
TANTO POR CIENTO DE FIBRAS RESULTANTES A PARTIR DE LAS HOJAS DE LA ESPECIE SANSEVIERIA TRIFASCIATA.

Masa foliar (g)	**Masa de fibras secas (g)**	**Porcentaje de extracción (%)**
1466,30	98,45	6,71
1512,69	110,45	7,30
1596,78	99,45	6,23
Promedio	**102,783**	**6,75**

B. Ensayos de resistencia a la tracción

Los ensayos mecánicos permitieron registrar la masa necesaria para generar la ruptura, así como el alargamiento máximo antes de la falla en cada condición evaluada. La Tabla III agrupa los valores promedio de las variables analizadas: masa de ruptura, alargamiento, diámetro, fuerza aplicada, área de sección transversal, resistencia a la tracción y deformación porcentual, comparando fibras sin tratamiento con aquellas sometidas a las distintas concentraciones de KOH (ver Tabla IV).

TABLA III
VALORES PROMEDIO DE PROPIEDADES MECÁNICAS SEGÚN CONCENTRACIÓN DE KOH

	FST-NT		FST-7,5g/L		FST-12,5g/L		FST-25g/L	
	kg	mm	kg	mm	kg	mm	Kg	mm
T1	0,34	0,28	0,41	0,51	0,34	0,87	0,27	0,78
T2	0,34	0,31	0,48	0,55	0,39	0,85	0,28	0,84
T3	0,28	0,37	0,44	0,57	0,36	0,83	0,26	0,89
T4	0,32	0,35	0,42	0,56	0,38	0,83	0,21	0,87
T5	0,34	0,29	0,43	0,53	0,38	0,91	0,24	0,84
T6	0,31	0,34	0,49	0,52	0,33	0,87	0,22	0,84
T7	0,29	0,36	0,47	0,54	0,38	0,85	0,19	0,85
T8	0,27	0,35	0,44	0,56	0,35	0,86	0,26	0,64
T9	0,25	0,43	0,46	0,51	0,31	0,88	0,24	0,89
T10	0,31	0,31	0,47	0,52	0,38	0,82	0,26	0,84
T11	0,32	0,37	0,48	0,48	0,32	0,91	0,17	0,82
Prom	0,306	0,342	0,458	0,534	0,358	0,861	0,236	0,827
Desv. Est	0,030	0,043	0,024	0,028	0,029	0,032	0,035	0,069

Nota: Des. Est.: Desviación estándar; FST: Fuerza máxima a tracción; NT: Sin tratamiento; ST: Con tratamiento; Prom.: Promedio.

TABLA IV
CÁLCULOS PROMEDIO DE RESISTENCIA EN TRACCIÓN, PORCENTAJE DE ALARGAMIENTO A LA RUPTURA DE FIBRAS ÚNICAS, COMO EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE KOH.

	Masa (Kg)	Alarg. (mm)	Diámetro (mm)	Fuerza (N)	Área (mm^2)	Tensión (MPa)	% Alar.
FST - NT	0.306	0.342	0.105	3.002	0.0087	344.89	1.14
FST -7.5g/L KOH	0.458	0.534	0.098	4.488	0.0075	598.15	1.78
FST - 12.5g/L KOH	0.358	0.861	0.089	3.508	0.0062	569.34	2.87
FST -25g/L KOH	0.236	0.827	0.082	2.314	0.0053	432.33	2.76

Nota: Lo = 30 mm (en todos los casos)

* Para el cálculo de tensión se ha considerado área circular de fibras; Cálculo individual $\sigma_i = F_i/A_i$ para cada réplica; posteriormente se promedió por tratamiento (Lo = 30 mm).

B.1 Resultados del ANOVA (Resistencia a la tracción):

- Prueba de Shapiro Wilk:

W = 0.96; p = 0.32 (normalidad confirmada)

- Prueba de Levene:

F = 0.48; p = 0.70 (homogeneidad de varianzas confirmada)

- ANOVA:

$F_{3,40} = 108.42$; $p \leq 0.001$; $\eta^2 = 0.89$ (tamaño del efecto muy grande)

- Prueba post-hoc de Tukey:

El tratamiento de 7.5 g/L difiere significativamente de todos los demás ($p < 0.001$); 12.5 g/L difiere de 25 g/L y del control; 25 g/L difiere del control.

C. Análisis mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros FTIR revelan modificaciones en las señales características de los grupos funcionales de la fibra, asociadas directamente a la acción del tratamiento alcalino. La banda amplia registrada entre 3750 y 3000 cm^{-1} corresponde a vibraciones de grupos hidroxilo (-OH), cuya intensidad disminuye progresivamente al aumentar la concentración de KOH, lo que indica reducción de humedad y de grupos hidroxilos libres en hemicelulosas y componentes amorfos. Las señales cercanas a 2920 y 2860 cm^{-1} se atribuyen a enlaces C–H de las cadenas alifáticas de la celulosa, presentando mayor definición en muestras tratadas al eliminar sustancias que generan interferencias.

La señal en el rango de 1730–1710 cm^{-1}, vinculada a grupos carbonilo de hemicelulosas y extractivos, muestra una disminución notable en intensidad, confirmando su remoción parcial. La banda entre 1640 y 1620 cm^{-1}, asociada a agua adsorbida, también se reduce consistentemente con la menor higroscopicidad de las fibras modificadas. Por su parte, las señales de 1595 a 1505 cm^{-1}, correspondientes a estructuras aromáticas de la lignina, disminuyen proporcionalmente a la concentración aplicada. Finalmente, las bandas a 1430 y 1320 cm^{-1} muestran aumento relativo de intensidad, indicando tendencia hacia mayor orden estructural; sin embargo, la cuantificación de cristalinidad requiere difracción de rayos X (DRX), estudio que se recomienda para trabajos complementarios. (ver Figura 6).

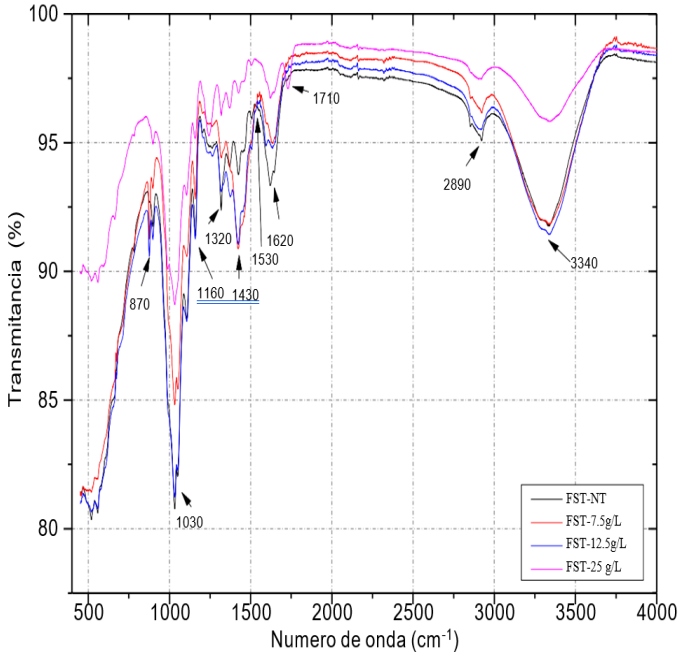


Fig. 6 Curvas de FTIR para muestra de fibras. Ningún tratamiento (NT); 7.5g/L de KOH; 12.5g/L de KOH y 25g/L de KOH.

D. Efecto del tratamiento alcalino con KOH sobre la composición química de las fibras

La Tabla V presenta la composición química promedio en base seca de las fibras en su condición original (FST-ST) y tras ser sometidas a tratamiento alcalino con KOH en tres concentraciones crecientes: 7,5 g/L, 12,5 g/L y 25 g/L, permitiendo evaluar cuantitativamente la influencia de la concentración sobre cada componente estructural.

Se observa que el tratamiento produce una reducción progresiva y sostenida del contenido de humedad, que desciende de 10,20 % hasta 5,54 %; de extractivos, que pasa de 1,92 % a 1,18 %; de lignina, que disminuye de 21,52 % a 16,62 %; y de hemicelulosa, que se reduce de 15,01 % a 11,38 %. Esta disminución resulta más pronunciada conforme se incrementa la concentración de KOH. Simultáneamente, se registra un aumento continuo del contenido de holocelulosa, que pasa de 76,46 % a 80,53 %, y dentro de esta, de la alfa-celulosa, que crece de 55,20 % a 59,32 %, acompañado también de incrementos en las fracciones beta y gamma celulosa.

Estos resultados confirman que el tratamiento elimina componentes lábiles, enriquece la fibra en celulosa ordenada y refuerza su estructura, sin alterar su naturaleza fundamental; dentro del rango estudiado, mayor concentración de KOH produce una modificación más efectiva.

TABLA V
COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIO DE FIBRAS SIN TRATAMIENTO Y SOMETIDAS A TRATAMIENTO ALCALINO

	Base Seca						
	% Hum.	% Extrac.	% Lig.	% Holo.	Cel.		Hemi.
					Alfa Cel.	Beta Cel.	Gamma Cel.
FST-ST	10,20	1,92	21,52	76,46	55,20	6,25	15,01
7.5g/L KOH	7,03	1,75	18,10	78,62	56,87	8,53	13,22
12.5g/L KOH	5,92	1,49	17,87	79,37	57,44	9,01	12,92
25g/L KOH	5,54	1,18	16,62	80,53	59,32	9,83	11,38

Nota: Composición química en base seca (promedio ± DE, n = 3)
- FST: Fuerza máxima a tracción; Hum: Humedad; Extrac: Extractivos; Lig: Lignina; Holo: Holocelulosa; Cel: Celulosa; Hemi: Hemicelulosa

E. Análisis Térmico de fibras

Las curvas termogravimétricas de las fibras tratadas y no tratadas (ver Figura 7) mostraron perfiles de degradación globalmente similares, aunque con ligeros desplazamientos hacia temperaturas mayores en las muestras mercerizadas. En las fibras sin tratamiento, la degradación se inició alrededor de 280 °C y finalizó cerca de 423 °C, con una temperatura media de degradación de 350 °C (ver Figura 8). En las fibras tratadas con KOH, estos valores aumentaron hasta aproximadamente 288 °C para la temperatura inicial, 434 °C para la temperatura final y 356 °C para la temperatura media, siendo el tratamiento con 25,0 g/L de KOH el que mostró el desplazamiento más alto (ver Figura 9).

Asimismo, en el intervalo de baja temperatura, asociado principalmente a la pérdida de humedad, las fibras tratadas mostraron una menor pérdida de masa en comparación con las no tratadas. Este comportamiento fue coherente con la disminución del contenido de humedad reportada en la caracterización química. En conjunto, los resultados térmicos indicaron que el tratamiento alcalino generó una mejora moderada de la estabilidad térmica de la fibra, sin modificar de forma drástica el patrón general de degradación (ver Tabla VI y Figura 10 sobre la degradación ascendente de la fibra).

TABLA VI
TEMPERATURAS CARACTERÍSTICAS DE DEGRADACIÓN (PROMEDIO, N = 2)

	T_{inicio} (°C)	T_{media} (°C)	T_{final} (°C)	Pérdida de masa total (%)
FST - NT	280 ± 2	350 ± 3	423 ± 2	89,4 ± 0,8
FST -7.5g/L KOH	284 ± 2	353 ± 2	429 ± 3	86,2 ± 0,6
FST - 12.5g/L KOH	286 ± 1	354 ± 2	431 ± 2	85,1 ± 0,5
FST -25g/L KOH	288 ± 2	356 ± 2	434 ± 2	84,3 ± 0,4

Nota: Valores obtenidos a partir de dos mediciones por condición; los desplazamientos observados son de magnitud moderada.

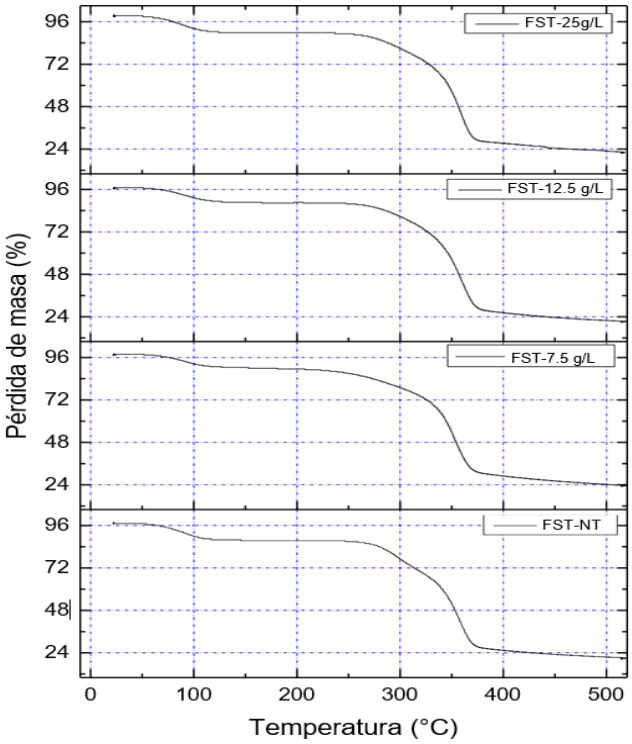


Fig. 7 Datos de análisis térmico (TGA) obtenidos para las muestras de fibrassometidas a tratamiento alcalino.

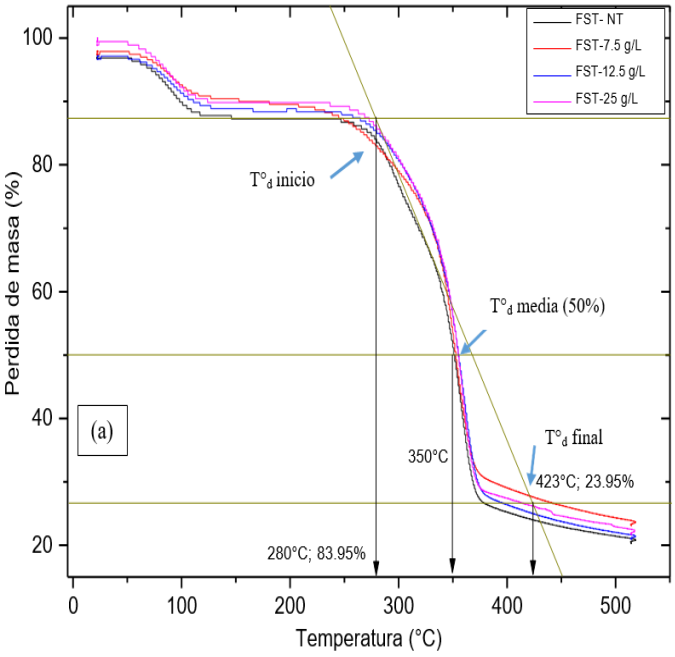


Fig. 8 Datos de temperatura de inicio y final de degradación, temperatura media dedegradación (50% pérdida de masa) de fibras tratadas y no tratadas. (a) Fibras sin tratamiento

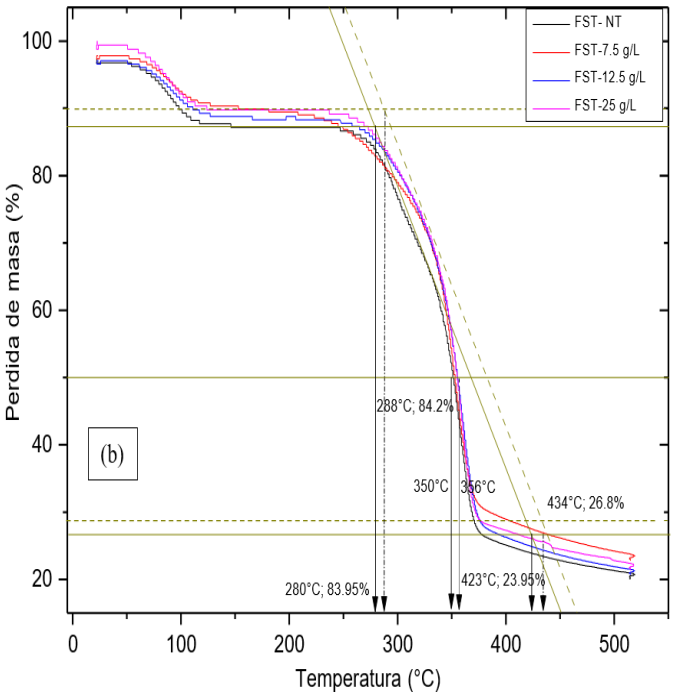


Fig. 9 Datos de temperatura de inicio y final de degradación, temperatura media dedegradación (50% pérdida de masa) de fibras tratadas y no tratadas. (b) Fibras tratadas.

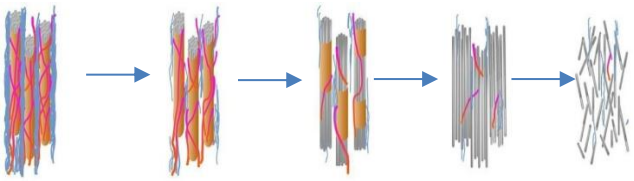


Fig. 10 Secuencia de la degradación alcalina de la fibra [31].

IV. DISCUSIONES

El análisis morfológico mediante micrografías SEM (Figura 3) permitió constatar que las fibras de *Sansevieria trifasciata* presentan diámetros transversales que oscilan entre 78,93 y 83,26 µm. Esta variabilidad se atribuye a factores propios del desarrollo vegetal, como condiciones de crecimiento y madurez de la hoja, tal como ha sido reportado en estudios sobre propiedades estructurales de fibras naturales [32]. Asimismo, se observó una reducción progresiva del diámetro conforme aumentó la concentración de KOH, acompañada de una mayor rugosidad superficial visible en la Figura 4 y resumida en la Figura 5. Este comportamiento confirma que el tratamiento alcalino remueve de forma gradual sustancias amorfas, ceras y extractivos que recubren la estructura fibrosa, coincidiendo con hallazgos en otras especies lignocelulósicas tratadas con soluciones alcalinas [33]. El rendimiento promedio de extracción alcanzó el 6,75% (Tabla II), valor comparable con el de fibras de agave y otras plantas tropicales, y que valida la viabilidad técnica y disponibilidad constante de esta materia prima en el contexto local [34, 35].

Desde el punto de vista composicional, los cambios registrados en la Tabla V reducción de lignina y hemicelulosa, e incremento relativo de alfa-celulosa fueron respaldados por los espectros FTIR de la Figura 6. La disminución en intensidad de bandas asociadas a grupos hidroxilo y carbonilo evidencia la remoción de componentes no celulósicos, mientras que el aumento de señales correspondientes a celulosa cristalina confirma el enriquecimiento de la fracción estructuralmente resistente [36]. La acción selectiva del KOH sobre enlaces éter y éster permite solubilizar hemicelulosas y parte de la lignina sin alterar de forma inmediata la estructura ordenada de la celulosa, lo que explica la reorganización observada en las proporciones de holocelulosa, alfa-celulosa y sus fracciones.

El análisis de las propiedades mecánicas (Tabla III y Tabla IV) reveló una relación definida entre concentración de álcali y desempeño de la fibra: al aumentar el contenido de KOH, la masa necesaria para la ruptura disminuye mientras que el alargamiento a la rotura aumenta, indicando un incremento en la ductilidad del material. Este efecto se relaciona con la eliminación de componentes rígidos como la lignina y la posible plastificación de la estructura celulósica [37]. Destacadamente, la concentración de 7,5 g/L generó el mayor fortalecimiento mecánico entre las condiciones evaluadas, alcanzando 598,15 MPa un incremento superior al 73 % respecto a las fibras sin tratamiento. Esta mejora deriva de la limpieza superficial, la remoción de puntos débiles y la mayor alineación de las microfibrillas, factores que optimizan la transmisión de cargas [34]. Modelos de simulación de propiedades elásticas en materiales compuestos también respaldan que la homogeneidad y limpieza estructural son determinantes para maximizar la resistencia mecánica [32]. Por el contrario, concentraciones superiores a 7,5 g/L provocaron una disminución progresiva de la resistencia, sugiriendo el inicio de un sobretratamiento que degrada incluso la fracción ordenada de la celulosa. Este umbral de efecto beneficioso seguido de daño estructural coincide con reportes en *Sansevieria ehrenbergii* y otras fibras vegetales sometidas a modificaciones alcalinas [8, 9].

Por su parte, el análisis térmico (Figuras 7 a 10) demostró que el tratamiento con KOH desplaza los eventos de degradación hacia temperaturas superiores sin alterar el patrón general de descomposición característico de las fibras lignocelulósicas [38]. Mientras que las fibras sin tratamiento iniciaron su degradación a 280 °C y alcanzaron una temperatura media de 350 °C, las tratadas registraron valores de inicio hasta 288 °C y media hasta 356 °C. Esta mejora en estabilidad térmica está directamente ligada a la reducción de humedad y de componentes termolábiles como la hemicelulosa, así como al aumento relativo de celulosa cristalina, que requiere mayor energía para su descomposición.

En síntesis, los resultados evidencian que el tratamiento alcalino permite modificar de forma controlada y dirigida las propiedades de las fibras de *Sansevieria trifasciata*. La

concentración de 7,5 g/L se establece como la más adecuada entre las concentraciones evaluadas, al optimizar resistencia mecánica y estabilidad térmica sin generar daños estructurales irreversibles. Estos hallazgos refuerzan el potencial de esta especie como alternativa renovable y de bajo costo para el desarrollo de materiales compuestos en el país, abriendo camino a nuevas aplicaciones industriales basadas en recursos locales.

V. CONCLUSIONES

- El tratamiento alcalino con KOH modificó de manera progresiva la composición química de las fibras de *Sansevieria trifasciata*, reduciendo los contenidos de lignina y hemicelulosa e incrementando la fracción celulósica.
- El tratamiento también produjo cambios físicos evidentes, caracterizados por la disminución del diámetro medio de la fibra, la reducción del contenido de humedad y el aumento de la rugosidad superficial.
- La mejor respuesta mecánica entre las concentraciones evaluadas se obtuvo con 7,5 g/L de KOH, condición en la que la resistencia máxima a la tracción aumentó de 344,89 MPa en las fibras sin tratamiento a 598,15 MPa. Aunque los tratamientos con 12,5g/L y 25,0 g/L también incrementaron la deformabilidad de la fibra, concentraciones más altas redujeron la resistencia respecto al valor máximo alcanzado.
- En términos integrales, la concentración de 7,5 g/L de KOH representó la condición más favorable entre las concentraciones evaluadas para optimizar el equilibrio entre modificación química y respuesta mecánica de las fibras.
- Los resultados tienen implicaciones potenciales para el desarrollo de materiales compuestos ecoamigables, demostrando que las fibras de *Sansevieria trifasciata* tratadas con KOH podrían ser una alternativa viable y ventajosa para la fabricación de productos sostenibles. Su uso, gracias a la mejora en propiedades mecánicas y la facilitación de la interacción con matrices poliméricas, contribuye a reducir la dependencia de materiales sintéticos y la contaminación por plásticos.
- El tratamiento alcalino con KOH modifica favorablemente el comportamiento térmico de las fibras e incrementa moderadamente su estabilidad: la temperatura media de degradación pasa de 350 °C a 356 °C, con desplazamiento del inicio de la degradación a 288 °C y su fin a 434 °C. Esta mejora se relaciona con la reducción del contenido de humedad (de 10,20 % a 5,54 %), lignina (de 21,52 % a 16,62 %) y hemicelulosa (de 15,01 % a 11,38 %), así como con el aumento del contenido de alfa-celulosa, que pasa de 55,20 % a 59,32 %, todo ello por la eliminación de componentes lábiles y el incremento de celulosa ordenada. El orden y la naturaleza de las etapas de degradación se mantienen inalterados, lo que confirma que el tratamiento no modifica el mecanismo básico de descomposición ni produce daños estructurales graves, sino que únicamente optimiza la resistencia térmica del material. En consecuencia, las fibras tratadas soportan temperaturas superiores, por lo que resultan aptas para su uso en procesos de elaboración y procesamiento de materiales compuestos.
- La viabilidad como refuerzo en compuestos y la compatibilidad con matrices poliméricas requieren verificación directa; no se concluye su desempeño en matriz.
- Los beneficios ambientales son potenciales; su cuantificación exige análisis de ciclo de vida que incluya consumo de agua, reactivos y gestión de efluentes.

REFERENCIAS

[1] Rêgo, M. D. C. A., Lopes, A. C. D. A., Barros, R. F. M. D., Lamas, A. M., Costa, M. F., & Ferreira-Gomes, R. L. (2020). Morphological characterization and genetic diversity in ornamental specimens of the genus Sansevieria. *Revista Caatinga*, *33*, 985-992. https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n413rc.

[2] Nikam, G., Bagade, S., Yadav, S., Singh, H., Lobo, C., & Shinde, S. (2025). Snake Plant: A Multifunctional Indoor Plant. *Research Perspective on Biological Science Vol. 2*, 113-125. https://doi.org/10.9734/bpi/rpbs/v2/5058.

[3] Furlan, V., & Pirondo, A. (2020). Vínculos y relaciones intracomunitarias a través del uso de plantas protectoras: Formas de construir diversidad desde los sistemas agroforestales familiares. *Ethnobotany Research and Applications, 19*, 1-17. https://doi.org/10.32859/era.19.24.1-17.

[4] Zavaleta Guzmán, M. A. (2025). *Influencia del porcentaje en peso de las fibras de agave, sobre la resistencia a la tracción e impacto de un compuesto de matriz vinil ester* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo). Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Trujillo. https://hdl.handle.net/20.500.14414/24012.

[5] Vega Acosta, L. A., & Villanueva Sánchez, J. A. (2020). *Influencia de la concentración de hidróxido de sodio sobre la resistencia a la tracción de fibras individuales de Stipa Ichu* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo). Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Trujillo. https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/98b99167-86af-450f-816e-555a62b07a05/content.

[6] Ahmed, Z., Haque, M. T., & Azad, M. A. K. A. (2024). Research of various natural fibers from eco-friendly plant sources. *International Journal of Research and Scientific Innovation, 11*(5), 1075-1083. https://doi.org/10.51244/IJRSI.2024.1105072.

[7] Rangappa, S. M., Siengchin, S., Parameswaranpillai, J., Jawaid, M., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Lignocellulosic fiber reinforced composites: Progress, performance, properties, applications, and future perspectives. *Polymer Composites*, *43*(2), 645-691. https://doi.org/10.1002/pc.26413

[8] Wantahe, E., Fednand Kindole, C., & Bigambo, P. (2024). Effect of Chemical Treatment on the Physicochemical and Mechanical Properties of Sansevieria ehrenbergii (SE) Leaf Fibers and Their Utilization in Textiles. *Journal of Natural Fibers*, *21*(1), 2407896. https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2407896.

[9] Sahu, P., & Gupta, M. K. (2020). A review on the properties of natural fibres and its bio-composites: Effect of alkali treatment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, *234*(1), 198-217. https://doi.org/10.1177/1464420719875163.

[10] Eleutério, T., Trota, M. J., Meirelles, M. G., & Vasconcelos, H. C. (2025). A review of natural fibers: classification, composition, extraction, treatments, and applications. *Fibers*, *13*(9), 119. https://doi.org/10.3390/fib13090119

[11] Widodo, E., Pratikto, S., & Widodo, T. D. (2024). Effect of alkali on the mechanical properties of Sansevieria fibre bio-composites. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, *121*(1), 117-134. https://doi.org/10.37934/aram.121.1.117134

[12] Ali, S. S., Alsharbaty, M. H. M., Al-Tohamy, R., Khalil, M. A., Schagerl, M., Al-Zahrani, M., & Sun, J. (2024). Microplastics as an emerging potential threat: Toxicity, life cycle assessment, and management. Toxics, 12(12), 909. https://doi.org/10.3390/toxics12120909.

[13] Nagtode, V. S., Cardoza, C., Yasin, H. K. A., Mali, S. N., Tambe, S. M., Roy, P., ... & Pratap, A. P. (2023). Green surfactants (biosurfactants): a petroleum-free substitute for Sustainability─ Comparison, applications, market, and future prospects. ACS omega, 8(13), 11674-11699. https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00591

[14] Sun, Q., Ren, S. Y., & Ni, H. G. (2020). Incidence of microplastics in personal care products: an appreciable part of plastic pollution. *Science of the Total Environment*, *742*, 140218. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140218.

[15] Moshood, T. D., Nawanir, G., Mahmud, F., Mohamad, F., Ahmad, M. H., & AbdulGhani, A. (2022). Sustainability of biodegradable plastics: New problem or solution to solve the global plastic pollution? *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, *5*, 100273. https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100273.

[16] Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *364*(1526), 2127-2139. https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0289.

[17] Mori, R. (2023). Replacing all petroleum-based chemical products with natural biomass-based chemical products: a tutorial review. *RSC Sustainability*, *1*(2), 179-212. https://doi.org/10.1039/D2SU00014H.

[18] Rajendran, S., Al-Samydai, A., Palani, G., Trilaksana, H., Sathish, T., Giri, J., ... & Nasri, F. (2025). Replacement of Petroleum Based Products With Plant-Based Materials, Green and Sustainable Energy—A Review. *Engineering Reports*, *7*(4), e70108. https://doi.org/10.1002/eng2.70108.

[19] Vargas-García, Y., Pazmiño-Sánchez, J., & Dávila-Rincón, J. (2021). Potencial de Biomasa en América del Sur para la producción de Bioplasticos. Una Revisión. *Revista Politécnica*, *48*(2), 7-20. https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01.

[20] Thu, Z. M., Myo, K. K., Aung, H. T., Armijos, C., & Vidari, G. (2020). Flavonoids and stilbenoids of the genera Dracaena and Sansevieria: Structures and bioactivities. *Molecules*, *25*(11), 2608. https://doi.org/10.3390/molecules25112608.

[21] de Azevedo, A. R., Cruz, A. S., Marvila, M. T., de Oliveira, L. B., Monteiro, S. N., Vieira, C. M. F., ... & Dajonas, M. (2021). Natural fibers as an alternative to synthetic fibers in reinforcement of geopolymer matrices: A comparative review. *Polymers*, *13*(15), 2493. https://doi.org/10.3390/polym13152493.

[22] Yabdee, S., Piromgarn, T., Kijmongkolvanich, S., & Egwutvongsa, S. (2024). Studying Factors in the Utilization of Sansevieria stuckyi God.-Leb. Fibers to Create Products with Environmentally Friendly Processes. *International Journal of Sustainable Development & Planning*, *19*(9), 1105-1115. https://doi.org/10.18280/ijsdp.190908.

[23] Shafqat, A., Tahir, A., Mahmood, A., Tabinda, A. B., Yasar, A., & Pugazhendhi, A. (2020). A review on environmental significance carbon foot prints of starch based bio-plastic: A substitute of conventional plastics. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *27*, 101540. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101540.

[24] Ansar, A., Du, J., Javed, Q., Adnan, M., & Javaid, I. (2025). Biodegradable waste in compost production: A review of its economic potential. *Nitrogen*, *6*(2), 24. https://doi.org/10.3390/nitrogen6020024.

[25] Suyuti, M. A., Darmadi, D. B., Winarto, W., & Setyarini, P. H. (2024). Liquid smoke treatment and microwave heating technology for cellulosic Sansevieria Trifasciata laurentii fibers. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *15*, 14211–14228. https://doi.org/10.1007/s13399-024-06335-1.

[26] Ibrahim, M. I., Dolah, R., Zuhri, M., Sharif, S., & Hassan, M. (2016). Chemical treatment evaluation of tensile properties for single Kenaf fiber. *J. Adv. Res. Appl. Mech*, *32*, 9-14. 10.1088/1742-6596/2129/1/012078

[27] Pelegrín, C. J., Ramos, M., Jiménez, A., & Garrigós, M. C. (2022). Chemical composition and bioactive antioxidants obtained by microwave-assisted extraction of Cyperus esculentus L. by-products: a valorization approach. *Frontiers in nutrition*, *9*, 944830. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.944830

[28] da Fonseca, S. C., Freitas, R. B., Sotiles, A. R., Schemczssen-Graeff, Z., Miranda, I. M. D. A., Biscaia, S. M. P., ... & Franco, C. R. C. (2025). 3D scaffold of hydroxyapatite/β tricalcium phosphate from mussel shells: Synthesis, characterization and cytotoxicity. *Heliyon*, *11*(1). 10.1016/j.heliyon.2024.e41585

[29] Raja, T., Devarajan, Y., Mehar, K., SP, P., Acharya, S. K., Patel, P., & Kumar, A. (2026). Biomass Valorization Of Sansevieria Trifasciata Leaves: Multifunctional Fiber Characterization for Sustainable Industrial Composites. *Journal of Natural Fibers*, *23*(1), 2684493. https://doi.org/10.1080/15440478.2026.2684493

[30] Chahal, P., Chokkiah, B., Sivasankarapillai, V. S., Raveendran, A., Siddiqui, M. R., Wabaidur, S. M., ... & Dhanusuraman, R. (2023). Synthesis and characterization of novel poly (Vinylidene Fluoride)-melamine electrospun nanofibers: an extensive analysis on mechanical and thermal behavior. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *32*(1), 243-250. https://doi.org/10.1007/s11665-022-07067-x

[31] Jianqiang W., Meyer, C. (2015). Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. Cement and Concrete Research. 73. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.019.

[32] Adeniyi, A. G., Adeoye, A. S., Ighalo, J. O., & Onifade, D. V. (2021). FEA of effective elastic properties of banana fiber-reinforced polystyrene composite. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, *28*(18), 1869-1877. https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1712628.

[33] Verma, D., & Goh, K. L. (2021). Effect of mercerization/alkali surface treatment of natural fibres and their utilization in polymer composites: Mechanical and morphological studies. *Journal of Composites Science*, *5*(7), 175. https://doi.org/10.3390/jcs5070175.

[34] Dhaou, I., Gargouri, A., & Mnif, R. (2026). Development and characterization of PLA biocomposites reinforced with date palm fibers: influence of enzymatic treatment, fiber content, and diameter on mechanical performance. Polymer Bulletin, 83(7), 338. https://doi.org/10.1007/s00289-026-06402-9

[35] Liku, E. T., Desissa, T. D., & Huluka, A. W. (2024). Extraction and characterization of lignocellulosic fiber from Prosopis Juliflora bark: Effects of retting method, fiber particle size and alkali treatment cycle on cellulosic properties. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, *8*, 100626. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100626.

[36] Shadhin, M., Tisha, N. J., Dulal, M., Jayaraman, R., & Rahman, M. (2026). Adhesion chemistry of plant-based cellulosic fibers and polymeric matrices in composites: a review. *RSC advances*, *16*(7), 6132-6163. https://doi.org/10.1039/D5RA09241H.

[37] Tian, J., Cao, Z., Qian, S., Xia, Y., Zhang, J., Kong, Y., ... & Takahashi, J. (2022). Improving tensile strength and impact toughness of plasticized poly (lactic acid) biocomposites by incorporating nanofibrillated cellulose. *Nanotechnology Reviews*, *11*(1), 2469-2482. https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0142.

[38] MUÑOZ-VELEZ, M. F., HIDALGO-SALAZAR, M. A., & MINA-HERNANDEZ, J. H. (2014). Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. Influencia de la modificación superficial. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, *12*(2), 60-70. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-35612014000200007&script=sci_arttext